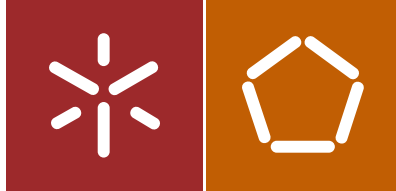


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Lourenço Manuel Ferreira Bastos

Modelação constitutiva de
materiais carregados com fibras.



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Lourenço Manuel Ferreira Bastos

Modelação constitutiva de
materiais carregados com fibras.

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia de Polímeros

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Júlio César Machado Viana

e coorientação do
Engenheiro Carlos Jorge Marques Ribeiro

DECLARAÇÃO

Nome: Lourenço Manuel Ferreira Bastos

Endereço eletrónico: lourenco.bastos@gmail.com

Telefone: 917033025

Bilhete de Identidade/Cartão do Cidadão: 14161392

Título da dissertação: Modelação constitutiva de materiais carregados com fibras

Orientador:

Professor Júlio César Machado Viana

Coorientador:

Engenheiro Carlos Jorge Marques Ribeiro

Ano de conclusão: 2015

Designação do Mestrado:

Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros

DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO EM VIGOR, NÃO É PERMITIDA A REPRODUÇÃO DE QUALQUER PARTE DESTA TESE/TRABALHO.

Universidade do Minho, ____/____/____

Assinatura:

Resumo

O trabalho realizado teve como objetivos a exploração, aplicação e validação de metodologias de modelação de materiais, reforçados com fibras curtas, utilizando como alicerce principal o *software* Digimat, que servirá tanto para a modelação constitutivas dos materiais como para o acoplamento de *softwares*. Serão ainda utilizados o MoldFlow, para a simulação numérica do processo de modelação por injeção e o ABAQUS, para a realização da simulação estrutural. O uso destes tem como finalidade a obtenção de uma simulação o mais próxima da realidade possível, tendo em conta a influência dos parâmetros do processo na simulação estrutural.

De forma a possibilitar um estudo comparativo entre realidade e simulação, foram realizados ensaios de flexão em provetes, cujo material era um polipropileno reforçado com 30% de fibra, obtendo-se assim o comportamento mecânico do material real que será comparado com o comportamento do material modelado, através de curvas tensão/deformação.

Antes da execução das simulações, estudou-se ainda algumas metodologias relacionadas com a modelação do material e com o acoplamento de *softwares*. Isto permitiu escolher os melhores métodos e parâmetros a usar na análise, tornando-a mais próxima da realidade experimental.

Com o primeiro caso de estudo é possível observar que as capacidades deste tipo de análise são bastante satisfatórias para casos simples, como é o caso dos provetes, obtendo-se resultados bastante próximos da realidade experimental. Constata-se também que a temperatura do fundido tem um grande impacto nas propriedades mecânicas do material e que a influência das restantes variáveis do processamento estudadas não é a mesma para o caso experimental e para o simulado.

Com o segundo caso de estudo observam-se também resultados bastante próximos da realidade experimental e, sendo este caso muito mais complexo que os provetes, chega-se à conclusão que a utilização destas metodologias de simulação acoplada leva a resultados precisos tanto para casos simples como para complexos.

Abstract

This study had the objectives of exploration, implementation and validation of methods to modeling short fiber reinforced materials, using as main foundation the software Digimat, which is used to both modeling the materials as for coupling softwares. It will also be used MoldFlow for numerical simulation of the injection molding process and ABAQUS, to carry out the structural simulation. The use of these aims to obtaining a simulation as close to reality as possible, taking into account the influence of process parameters on the structural simulation.

In order to enable a comparative study between reality and simulation, were conducted flexural tests to test specimens, where the material was a polypropylene reinforced with 30% fiber, thus obtaining the mechanical behavior of the actual material to be compared with the behavior of the modeled material through stress/strain curves.

Prior to the execution of simulations, studies were carried out regarding some methodologies related to the modeling material and the software coupling. This permitted to choose the best methods and parameters to use in the analysis, making it closer to the experimental reality.

In the first case study is possible to observe that the capacities of this type of analysis are quite satisfactory for simple cases, as is the case of the test specimens, obtaining results very close to experimental reality. It is also noted that the melt temperature has a major impact on the mechanical properties of the material and that the influence of the other processing variables studied is not the same for the experimental and simulated cases.

In the second case study are also observed results very close to the experimental reality and being this case much more complex that the test specimen case, it becomes apparent that the use of these coupled analysis methodologies lead to accurate results for both simple and complex cases.

Agradecimentos

Neste parágrafo serão mencionadas algumas pessoas que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação e por isso merecem o devido agradecimento.

Aos meus orientadores, Professor Júlio César Machado Viana e Engenheiro Carlos Jorge Marques Ribeiro, pelo acompanhamento, apoio e aconselhamento prestado ao longo de todo o trabalho.

Aos engenheiros do PIEP, Marta Gomes, no tempo dispensado para a ajuda no processamento, Diana Meireles, pela disponibilidade de auxílio na criação do modelo estrutural, Nuno Gonçalves, pela disponibilidade de auxílio na perceção de *softwares*, e Andreia Vilela, pelo tempo dispensado para a ajuda na realização nos ensaios mecânicos.

À equipa de suporte técnico do Digimat/e-Xstream, pelo tempo e paciência disponibilizados no auxílio à criação e correção da metodologia de acoplamento de *softwares*.

Aos meus familiares, com especial ênfase, aos meus pais, Joaquim e Albertina, ao meu irmão, Joaquim, e à minha irmã, Nuna, pelo apoio incondicional dado ao longo de todo o trabalho e percurso académico.

Aos meus amigos, principalmente aqueles que mais me acompanharam na realização desta dissertação por estarem também a trabalhar no PIEP, Bruno, Tiago, Pedro e Rui, por proporcionarem momentos de humor e companheirismo, indispensáveis a realização desta dissertação.

À Rita, por todo o apoio, incentivo e por me ter dado forças para continuar nos momentos em que mais precisei.

A todos o meu mais profundo e sentido obrigado!

Índice

Resumo.....	I
Abstract.....	III
Agradecimentos.....	V
Índice.....	VII
Índice de figuras.....	XI
Índice de tabelas.....	XIII
Capítulo I - Estado da arte.....	1
1.1. Introdução.....	2
1.2. Orientação de fibras curtas de reforço	3
1.2.1 Morfologia típica de peças injetadas reforçadas com fibras curtas.....	3
1.2.2 Definição de tensor de orientação de fibras	5
1.3. Tensões residuais.....	7
1.4. Método de Taguchi.....	8
1.5. Variáveis do processamento	9
1.6. Mean-Field Homogenization.....	10
1.6.1 Solução de Eshelby.....	11
1.6.2 Problema de Inclusão simples.....	11
1.6.3 Modelo Mori-Tanaka	12
1.6.4 Modelo Dupla Inclusão	13
1.7. Homogeneização de primeira e segunda ordem.....	14
1.8. Multi-inclusion homogenization	14
1.8.1 Multi-step homogenization	15
1.8.2 Multi-level homogenization	15
1.9. Modelos de materiais	16
1.9.1 Elasticidade linear.....	17
1.9.2 Elastoplasticidade Von Mises/J2 (24) (32)	17
1.9.3 Plasticidade Drucker-Prager generalizada (24).....	19
1.10. Ferramentas numéricas utilizadas.....	21
1.10.1 Digimat	21
1.10.2 MoldFlow.....	27
1.10.3 ABAQUS.....	27
Capítulo II - Resultados experimentais	29

2.1.	Processamento (Material, injetora e provete).....	30
2.2.	Ensaio de flexão	31
Capítulo III - Estudos preliminares		35
3.1.	Objetivos	36
3.2.	Metodologias de criação de material	36
3.3.	Metodologias de homogeneização	38
3.4.	Metodologias de acoplamento de <i>softwares</i>	40
Capítulo IV - Caso de estudo: Flexão.....		43
4.1.	Simulação do processamento (MoldFlow)	44
4.1.1	Condições de processamentos	44
4.1.2	Tensor de orientação das fibras	45
4.1.3	Tensões residuais	46
4.2.	Simulação constitutiva do material (Digimat)	46
4.2.1	Digimat-MF	47
4.2.2	Digimat-MAP	48
4.2.3	Digimat-CAE	50
4.3.	Simulação estrutural (ABAQUS)	50
4.4.	Resultados obtidos	52
4.4.1	Simulação vs. Experimental	53
4.4.2	Influência das variáveis do processamento	55
4.4.3	Influência dos dados mapeados	58
Capítulo V - Caso de estudo: HYBRIDTEC		61
5.1.	Enquadramento	62
5.2.	Simulação do processamento	63
5.3.	Simulação constitutiva do material	66
5.4.	Validação do material	67
5.5.	Simulação estrutural	70
5.6.	Resultados obtidos	71
Capítulo VI - Conclusões		75
6.1.	Caso de estudo: Flexão.....	76
6.2.	Caso de estudo: HYBRIDTEC	77
6.3.	Obstáculos encontrados	77
Capítulo VII - Referências bibliográficas		79
Capítulo VIII - Anexos		83

8.1.	Metodologia de acoplamento	84
8.2.	Resultados obtidos no MoldFlow	86

Índice de figuras

Figura 1: Imagem retirada de uma análise no Digimat-MF.	3
Figura 2: Fluxo de fonte numa peça injetada (5).	4
Figura 3: Estrutura núcleo-casca (5).	4
Figura 4: Caracterização da orientação da fibra no eixo cartesiano.	5
Figura 5: Componentes do vetor unitário, p	5
Figura 6: Componentes do tensor de segunda ordem.	6
Figura 7: Etapas do processo de moldação por injeção (17).	7
Figura 8: Representação da homogeneização de campo médio (24).	10
Figura 9: Representação do problema de Eshelby (24).	11
Figura 10: Representação do problema de Inclusão Simples (24).	12
Figura 11: Esquema representativo do modelo Mori-Tanaka (24).	13
Figura 12: Esquema representativo do modelo de Dupla Inclusão (24).	14
Figura 13: Esquema representativo do modelo de homogeneização <i>Multi-step</i> (30).	15
Figura 14: Esquema representativo do modelo de homogeneização <i>Multi-level</i> (24).	16
Figura 15: Esquema comparativo dos modelos de homogeneização <i>Multi-level</i> e <i>Multi-step</i> (24).	16
Figura 16: Representação do comportamento elástico da fibra de vidro.	17
Figura 17: Curva representativa do modelo Von Mises/ J_2 (24).	18
Figura 18: Ilustração do funcionamento da ferramenta Digimat-MF (24).	22
Figura 19: Ilustração do funcionamento da ferramenta Digimat-FE (24).	22
Figura 20: Ilustração do funcionamento da ferramenta Digimat-MX (24).	23
Figura 21: Ilustração do funcionamento da ferramenta Digimat-CAE. (2)	23
Figura 22: Ilustração do funcionamento da ferramenta Digimat-MAP (24).	25
Figura 23: Exemplo de tolerâncias de uma peça (24).	26
Figura 24: Exemplo do porquê da utilização de tolerâncias no mapeamento (24).	26
Figura 25: Esquema do teste de flexão de três pontos e dimensões do provete.	31
Figura 26: Efeito das variáveis no módulo de Young.	33
Figura 27: Efeito das variáveis na tensão máxima.	33
Figura 28: Influência do expoente de <i>hardening</i> , m , e do módulo linear de <i>hardening</i> , k	37
Figura 29: Influência do módulo de <i>hardening</i> , R^∞	37
Figura 30: Influência da homogeneização de segunda ordem.	38
Figura 31: Gráfico de comparação entre modelo de Mori-Tanaka de Dupla Inclusão.	39
Figura 32: Metodologia de acoplamento de <i>softwares</i>	41
Figura 33: Metodologia de acoplamento de <i>softwares</i>	42
Figura 34: Resultados obtidos para o tensor de orientação das fibras para a condição 1.	45
Figura 35: Evolução da orientação das fibras ao longo da espessura para a condição 1.	45
Figura 36: Resultados obtidos para as tensões residuais para a condição 1.	46
Figura 37: Representação de um esferoide.	48
Figura 38: Curva tensão/deformação Digimat-MF.	48
Figura 39: Resultado do mapeamento das orientações das fibras.	49
Figura 40: Resultados do mapeamento das tensões residuais.	49
Figura 41: Representação do carregamento.	51

Figura 42: Representação das condições fronteira.....	51
Figura 43: Representação do elemento utilizado para obter os valores da tensão e da deformação.	52
Figura 44: Comparação simulado vs. Experimental, condição 1.....	53
Figura 45: Comparação simulado vs. Experimental, condição 2.....	53
Figura 46: Comparação simulado vs. Experimental, condição 3.....	53
Figura 47: Comparação simulado vs. Experimental, condição 4.....	53
Figura 48: Comparação simulado vs. Experimental, condição 5.....	54
Figura 49: Comparação simulado vs. Experimental, condição 6.....	54
Figura 50: Comparação simulado vs. Experimental, condição 7.....	54
Figura 51: Comparação simulado vs. Experimental, condição 8.....	54
Figura 52: Efeito da temperatura do fundido nas curvas simuladas para uma velocidade de 50mm/s. Condições 1 e 3, 5 e 7 sobrepostas.	55
Figura 53: Efeito da temperatura do fundido nas curvas simuladas para uma velocidade de 150mm/s. Condições 6 e 8, 2 e 4 sobrepostas	55
Figura 54: Influência da temperatura do fundido nas curvas simuladas.	56
Figura 55: Efeito da temperatura do fundido nas curvas simuladas para uma temperatura do fundido de 200°C.	56
Figura 56: Efeito da temperatura do fundido nas curvas simuladas para uma temperatura do fundido de 260°C.	56
Figura 57: Efeito da velocidade nas curvas simuladas para uma temperatura do fundido de 200°C.	56
Figura 58: Efeito da velocidade nas curvas simuladas para uma temperatura do fundido de 260°C.	56
Figura 59: Efeito das variáveis no módulo de Young.	57
Figura 60: Efeito das variáveis no módulo de Young.	57
Figura 61: Influência dos dados mapeados.	58
Figura 62: Ensaio experimental banco HYBRIDTEC.	62
Figura 63: Tensor de orientação as fibras para o banco.....	64
Figura 64: Tensões residuais do banco.	65
Figura 65: Resultados obtidos através da simulação numérica.	67
Figura 66: Dimensões provete de tração respeitando a norma ISO 527-2	68
Figura 67: Modelo estrutural do provete.	68
Figura 68: Comparação de resultados simulação acoplada vs. experimental.....	69
Figura 69: Condições fronteira e carga aplicada.	70
Figura 70: Resultados simulação acoplada. Deformação para a aplicação da força de 750N....	71
Figura 71: Comparação de resultados, simulação acoplada vs. simulação apenas com ABAQUS.	72
Figura 72: Comparação de resultados simulados vs. Experimentais.....	73

Índice de tabelas

Tabela 1: Variáveis do processamento.	30
Tabela 2: Resultados obtidos nos ensaios de flexão de três pontos	31
Tabela 3: Método de Taguchi.	32
Tabela 4: Método de Taguchi: efeito das variáveis.	32
Tabela 5: Condições da simulação do processamento.	44
Tabela 6: Propriedades dos materiais utilizados	47
Tabela 7: Definição da microestrutura.	48
Tabela 8: Resultados simulados vs. experimental	54
Tabela 9: Método de Taguchi dos resultados simulados.	57
Tabela 10: Método de Taguchi: Efeito das variáveis.	57
Tabela 11: Propriedades do material.	63
Tabela 12: Propriedades dos materiais.	66
Tabela 13: Parâmetros da microestrutura.	66
Tabela 14: Comparação de resultados, simulação acoplada vs. simulação apenas com ABAQUS.	72

Capítulo I - Estado da arte

1.1. Introdução

Os materiais compósitos são um modo bastante eficaz de obter materiais com grandes capacidades mecânicas tendo também um peso relativamente baixo. No entanto existem algumas questões relacionadas com estes materiais, tais como, que materiais utilizar, em que quantidades, com que formas, que orientação devem ter as partículas de reforço.

O grande desafio é encontrar a resposta certa para estas perguntas, obtendo-se assim o melhor equilíbrio entre desempenho e custo e, como é óbvio, obter propriedades que cumpram satisfatoriamente os requisitos do produto.

Uma técnica para responder a estas perguntas seria a criação e teste de protótipos até que os requisitos fossem cumpridos. Isto não só levaria a um grande desperdício de tempo e dinheiro mas também não nos daria grandes garantias quanto ao comportamento do material. Aqui entram as técnicas de modelação multi-escala do material entram. Estas consistem na previsão do comportamento final (isto é, macroscópico) de um material compósito com base na modelação da sua microestrutura. Na verdade, a modelação multi-escala do material permite limitar o número de protótipos e de ciclos de teste do material através da simulação numérica, que prevê a resposta do material compósito (1).

Existem duas grandes abordagens para modelação multi-escala. A primeira baseia-se numa modelação detalhada da microestrutura (através do método de elementos finitos). A segunda é semi-analítica e baseia-se em métodos de homogeneização de campo médio (*Mean Field Homogenization*). Este segundo conjunto de métodos é implementado no DIGIMAT, que juntamente com o ABAQUS, permite fazer a modelação linear e não linear de materiais compósitos (1). Neste projeto serão comparados resultados utilizando ambos os modelos disponíveis de modo a que seja aplicado o mais adequado.

Estes métodos de homogeneização são ferramentas poderosas para simular o comportamento mecânico de materiais heterogéneos, em particular de materiais compósitos, a um custo computacional muito razoável. Melhores e melhores aproximações têm sido desenvolvidos ao longo dos anos, o que permite levar em conta não só a fração de volume e forma das fases no compósito, mas também a sua distribuição espacial (2).

1.2. Orientação de fibras curtas de reforço

Hoje em dia é bastante comum a utilização de fibras de reforço em peças de plástico com o objetivo ultrapassar a sua grande fraqueza que é a resistência mecânica. Contudo é necessário bastante cuidado no *design* de peças já que o seu comportamento é muito influenciável não só pela quantidade/percentagem de fibra presente no material mas também pela orientação de cada uma das fibras e a previsão correta dos padrões complexos desta orientação é de grande relevância e complexidade.

Como se pode observar na figura 1, a utilização de diferentes orientações influencia drasticamente o comportamento do material. Por este motivo é muito importante utilizar orientações o mais realistas possível em simulações estruturais.

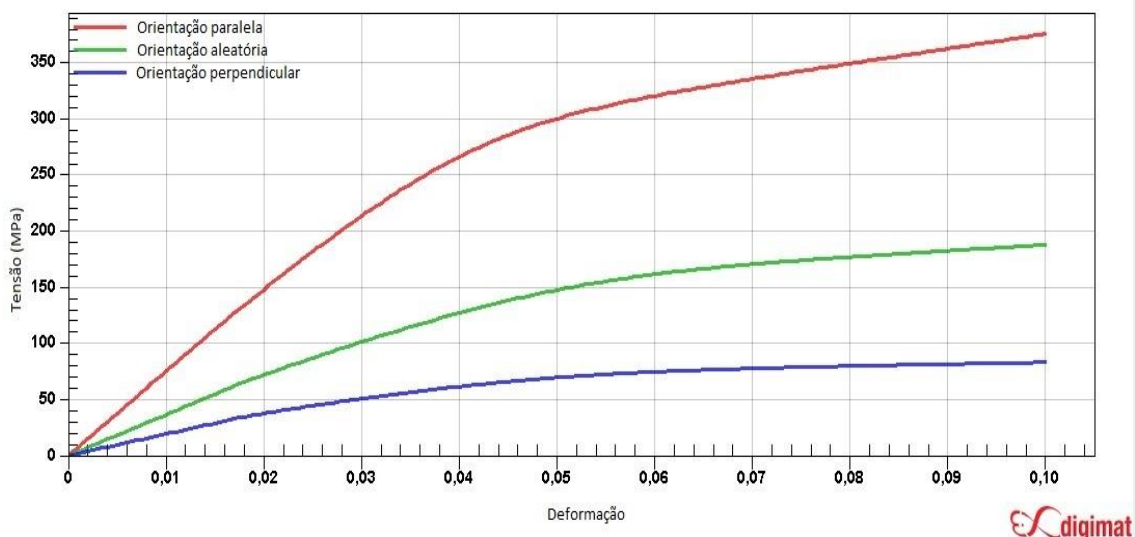


Figura 1: Imagem retirada de uma análise no Digimat-MF.

1.2.1 Morfologia típica de peças injetadas reforçadas com fibras curtas

Thomason (1999) elucidou as características gerais em estudos de distribuição de orientação de fibras e verificou que à medida que o material fundido preenche o molde existe fluxo em fonte (Figura 2). Este faz com que o material fundido seja depositado sobre as paredes do molde com a direção de alinhamento paralelo à direção de enchimento do molde. Aqui solidifica rapidamente e este alinhamento é retido na partícula sólida. Mais atrás da frente de fluxo domina o escoamento de corte e este produz níveis bastante uniformes de alinhamento de fibras. No centro da massa fundida, a taxa de corte é baixa e o fluxo é extensional (3) (4).

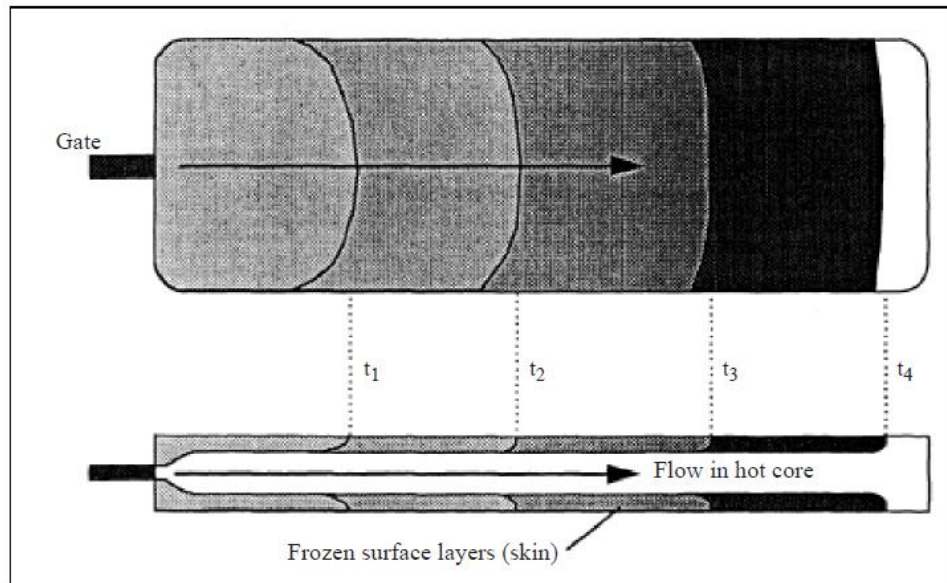


Figura 2: Fluxo de fonte numa peça injetada (5).

Pode-se então dizer que o comportamento do fluxo resulta numa estrutura do tipo núcleo-casca nas peças moldadas (Figura 3). É aparente a partir do gráfico que o centro da peça é fortemente orientado transversalmente em relação ao fluxo e as fibras nos bordos da peça são fortemente orientadas paralelamente ao fluxo.

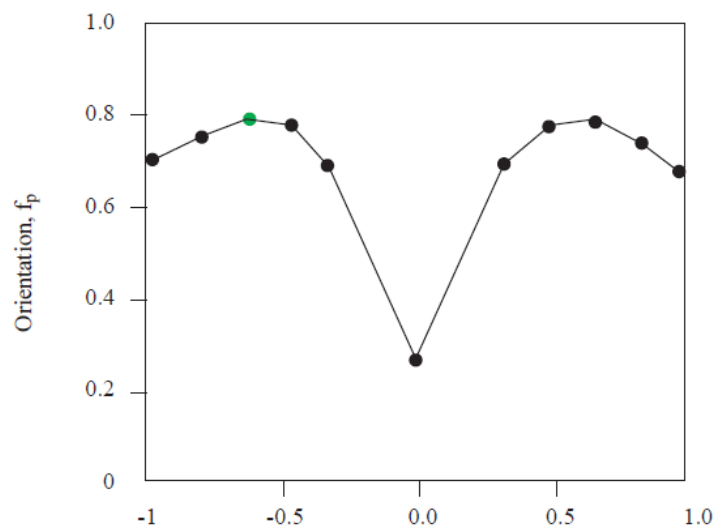


Figura 3: Estrutura núcleo-casca (5).

1.2.2 Definição de tensor de orientação de fibras

O estado de orientação das fibras de um compósito pode ser avaliada estatisticamente por uma função de distribuição de orientação, $\psi(\theta, \phi)$, que descreve a probabilidade de encontrar fibras com uma dada orientação em relação a uma direção pré-definida (6) (7) (8). Esta é criada a partir da definição da orientação de uma única fibra que é representada por um vetor, p , e os seus dois ângulos de orientação, o ângulo fora do plano, θ , e o ângulo no plano, ϕ (Figura 4).

Embora a função de distribuição de orientação seja a forma mais completa de se descrever a orientação de um compósito, esta é complexa e difícil de utilizar (8) (9). Por este motivo o uso de tensores de orientação foi introduzido de modo a obter uma descrição completa do estado de orientação a partir de um pequeno número de valores discretos. (7)

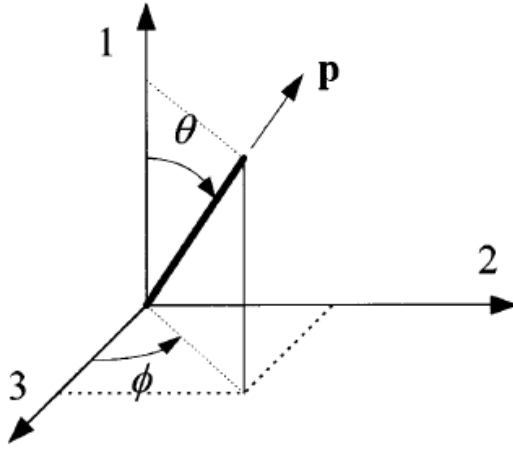


Figura 4: Caracterização da orientação da fibra no eixo cartesiano.

$$\begin{aligned} p_1 &= \cos \theta \\ p_2 &= \sin \theta \sin \phi \\ p_3 &= \sin \theta \cos \phi \end{aligned}$$

Figura 5: Componentes do vetor unitário, p .

Note-se que x_1 representa o eixo de direção de fluxo, x_2 é o eixo de direção de fluxo transversal e x_3 representa o eixo de direção da espessura. Assim, a função de distribuição de orientação pode ser escrita como uma função $\psi(p)$, dependente dos componentes do vetor p .

Os tensores de orientação são definidos como os momentos da função de distribuição de orientações, e o tensor de segunda ordem pode ser descrito da seguinte forma (8) (9):

$$a_{ij} = \int p_i p_j \psi(\vec{p}) d\vec{p} \quad (1)$$

A utilização do tensor de segunda ordem é conveniente em termos de tempo de cálculo e é preferencialmente utilizado pela maioria dos códigos comerciais (10), incluindo o Digimat. Este parece-se com uma matriz 3×3 , onde os seus elementos têm um significado físico. O valor de cada um dos valores da diagonal representa a orientação relativa em torno de um dos eixos coordenados. Os eixos são definidos como 1-radial, 2-tangencial, 3- na direção da espessura (8) (10). Os elementos não-diagonais são simétricos e dão informações sobre as direções principais e podem não coincidir com o sistema de coordenadas utilizado (11). O fluxo em compósitos poliméricos moldados por injeção é planar, levando a estados planares da orientação das fibras. Assim, são obtidos valores pequenos para o componente A33 do tensor. O elemento a11 tem valor próximo da unidade, se existir alta orientação no sentido do fluxo (8) (10).

Este tensor de segunda ordem é composto por nove componentes, no entanto devido à simetria dos elementos fora da diagonal ($a_{ij} = a_{ji}$), o número de componentes é reduzido para seis.

$$\begin{aligned} a_{11}^k &= \langle \sin^2 \theta^k \cos^2 \phi^k \rangle & a_{12}^k &= \langle \sin^2 \theta^k \cos \phi^k \sin \phi^k \rangle \\ a_{13}^k &= \langle \sin \theta^k \cos \theta^k \cos \phi^k \rangle & a_{22}^k &= \langle \sin^2 \theta^k \sin^2 \phi^k \rangle \\ a_{23}^k &= \langle \sin \theta^k \cos \theta^k \sin \phi^k \rangle & a_{33}^k &= \langle \cos^2 \theta^k \rangle \end{aligned}$$

Figura 6: Componentes do tensor de segunda ordem.

Em termos experimentais, o tensor da orientação das fibras pode ser obtido se um número estatisticamente significativo de fibras numa amostra é caracterizado em termos dos φ e θ . A partir desta informação e tendo em mente a suposição que existe comprimento uniforme das fibras, os tensores de orientação das fibras de segunda e quarta ordem podem ser definidos a partir dos componentes do vetor unitário p (figura 5) (10) (11) (12). Foi então sugerida a equação para o cálculo dos tensores (13):

$$a_{ij} = \frac{\sum_n p_{i_n} p_{j_n} F_n}{\sum_n F_n} \quad (2)$$

O parâmetro F_n é uma função de ponderação que corrige os desvios resultantes da probabilidade de uma fibra estar paralela ao plano de corte e é definida da seguinte forma (10) (12):

$$F(\phi, l) = \frac{l}{l \cos(\phi)} \quad \phi < \phi_c \quad (3)$$

1.3. Tensões residuais

Como é óbvio, em qualquer peça obtida através do processo de moldação por injeção são criadas tensões residuais após a injeção e arrefecimento da peça e a desconsideração destas tensões leva a uma má caracterização do estado de tensão de uma peça.

Tensões residuais, isto é, tensões que podem existir num material livre de cargas externas, geralmente resultam a partir de deformação plástica não homogênea (14). No processo de moldação, as tensões internas são “congeladas” dentro da cavidade do molde. As tensões residuais comumente discutidas na moldação por injeção incluem a tensão residual induzida por fluxo e tensão residual induzida termicamente (15). As tensões residuais induzidas por fluxo incluem as causadas devido ao gradiente de pressão elevada e orientação das cadeias poliméricas, enquanto que a tensão residual induzida termicamente é causada por um arrefecimento não uniforme da peça e diferenças entre coeficientes de expansão térmica da matriz e do polímero (15) (16).

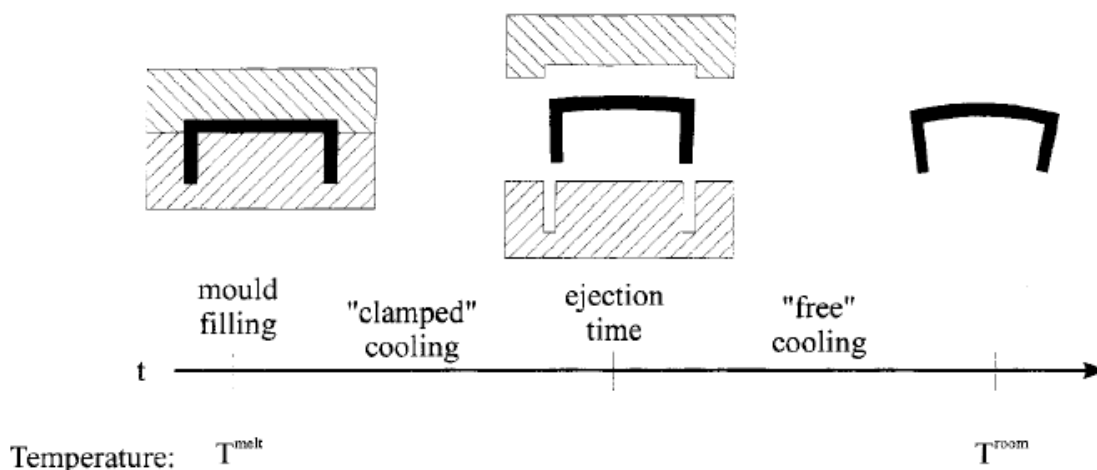


Figura 7: Etapas do processo de moldação por injeção (17).

Estas tensões residuais resultam no encolhimento/contração dos produtos finais e empenos e pode ser induzida uma redução da resistência à tração, da resistência à fadiga, das propriedades de impacto e quebra sob tensão induzida ambientalmente. Deste modo, a precisão dimensional e as propriedades das peças estão altamente relacionados com a distribuição de tensões residuais na peça moldada. A fim de obter um compósito injetado com qualidade é importante compreender o desenvolvimento de tensões internas, juntamente com o procedimento de moldação e avaliar a distribuição das tensões residuais no material compósito moldado (15) (16) (18) (19).

1.4. Método de Taguchi

O método Taguchi é uma tecnologia de *design* de parâmetros robusto que é útil para melhorar as propriedades desejadas dos materiais através do estudo dos fatores chave que controlam a sua produção e da otimização do procedimento para encontrar os melhores resultados (20). Assim, a técnica de otimização de Taguchi irá ser utilizada para identificar as configurações ótimas de fatores de controlo que maximizam as propriedades mecânicas de peças reforçadas com fibras moldadas por injeção.

O método experimental de Taguchi é levado a cabo através da utilização de uma matriz ortogonal, da razão sinal-ruído (S/R) e da análise de variância (ANOVA). O delineamento experimental fracionário de matrizes ortogonais permite calcular os principais efeitos e interações usando um número mínimo de experiências com uma confiabilidade permissiva (20).

A razão sinal -ruído (S/N) é a quantidade estatística que representa a potência de um sinal de resposta dividido pelo poder da variação do sinal devido ao ruído. A maximização da relação S/N leva à minimização de qualquer propriedade que é sensível ao ruído (21). Esta razão varia consoante o que é pretendido para a experiencia:

“Quanto maior melhor”:

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4)$$

“Quanto menor melhor”

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left(\frac{\sum (y_i^2)}{n} \right) \quad (5)$$

“Melhor o valor nominal”

$$\frac{S}{N} = 10 \log_{10} \left(\frac{\bar{Y}^2}{s^2} \right) \quad (6)$$

Onde y_i é a propriedade medida, n corresponde ao número de amostras em cada ensaio e s^2 é a variância amostral. Os níveis ótimos de fator com as maiores relações S/N podem então ser resumidos, o que vai minimizar a sensibilidade ao longo da gama de ruídos (21) (22).

Depois, a percentagem de contribuição de cada um dos fatores pode ser calculada e o conjunto ótimo de parâmetros dos fatores eficazes nestes dois processos de moldação podem ser determinados para se obter um produto com a resistência da linha de solda máxima (21) (22).

1.5. Variáveis do processamento

Como já foi referido, será utilizado o método de Taguchi de modo a estudar a influência de alguns parâmetros do processamento na orientação das fibras de reforço e nas tensões residuais. Esta influência será estudada separadamente para a orientação e para a tensão e posteriormente serão escolhidos os parâmetros adequados consoante os escolhidos para cada caso. Assim, irão ser escolhidos os três parâmetros mais importantes de modo a preencher uma matriz de Taguchi L_8 segundo a qual será realizado o processamento e a análise dos resultados experimentais.

No que toca à parte da orientação das fibras, através da pesquisa bibliográfica efetuada chegou-se à conclusão que os parâmetros mais estudados e consequentemente os mais influentes foram a temperatura do molde, temperatura do fundido, velocidade de injeção, pressão (na fase de pressurização) e tempo de arrefecimento (9) (10) (12) (23).

No que toca às tensões residuais, os parâmetros que se consideraram mais importantes de estudar foram a temperatura do molde, temperatura do fundido, velocidade de injeção e pressão (na fase de pressurização).

Assim, foram escolhidas em primeiro lugar as temperaturas do molde e do fundido devido à sua elevada importância tanto nas orientações como nas tensões residuais. Considerou-se ainda que seriam de elevada importância estudar a influência da velocidade de injeção no comportamento mecânico da peça, isto porque, será de esperar que a orientações das fibras de reforço tenha uma influência bastante superior no comportamento mecânico da peça quando comparada às tensões residuais e, como é óbvio, a velocidade de injeção é um parâmetro de extrema relevância na orientação das fibras.

1.6. Mean-Field Homogenization

Considerando o caso de materiais heterogêneos cuja microestrutura é constituída por uma matriz e múltiplas fases das chamadas "inclusões", que podem ser fibras curtas, plaquetas, microcavidades ou micro-fissuras, a modelação micromecânica tem como objetivo prever a interação entre a microestrutura e as propriedades macromecânicas.

O método de Mean-Field Homogenization baseia-se em modelos semi-analíticos e é base do Digimat-MF. O seu objetivo é calcular estimativas aproximadas mas precisas das médias de volume dos campos de tensão e deformação, tanto a nível do RVE (tensões e deformações macrométricas) como para cada fase. É importante realçar que este método não resolve o problema em detalhe e, portanto, não são computados os campos de tensão e deformação micrométricos para cada fase (24).

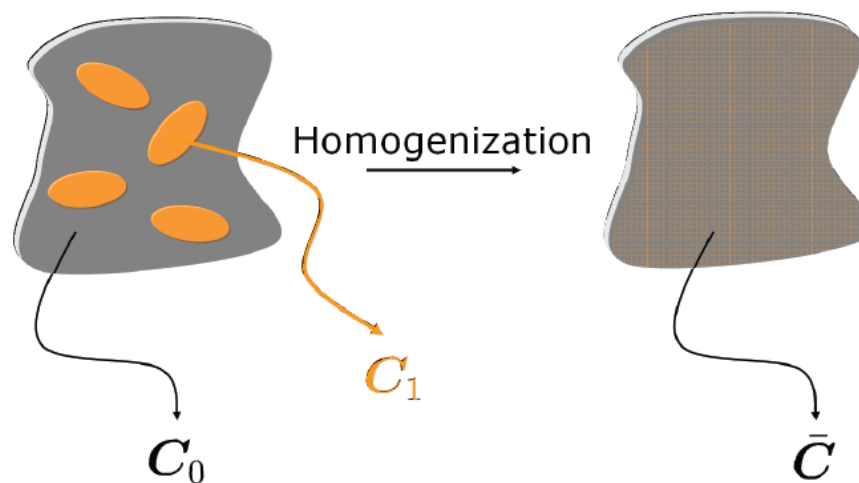


Figura 8: Representação da homogeneização de campo médio (24).

Concluindo, este método tem como vantagens a facilidade de uso, velocidade de execução e uso reduzida da memória do computador. A sua principal desvantagem é que apenas fornece aproximações das médias volumétricas da tensão e da deformação, tanto a nível macrométrico como para cada fase.

Nas ferramentas Digimat existem dois tipos de esquemas que é possível escolher e que determinarão o modo de lidar com as inclusões: o modelo Mori-Tanaka e o modelo de Dupla Inclusão. Estes modelos baseiam-se em duas bases: o problema/solução de Eshelby e o problema de Inclusão Simples que serão explicados a seguir.

1.6.1 Solução de Eshelby

Eshelby resolveu o seguinte problema: dentro de um sólido infinito de rigidez uniforme C_0 , um elipsoide (I) é cortado e sofre uma deformação chamada de *Eigenstrain*, ε^* (24). Esta representa qualquer deformação permanente que acontece no material devido a processos inelásticos, tais como a deformação plástica, transformações cristalográficas, incompatibilidades das expansões térmicas entre as diferentes partes de um conjunto, etc (25).

O elipsoide é depois soldado de volta à cavidade que ocupava.

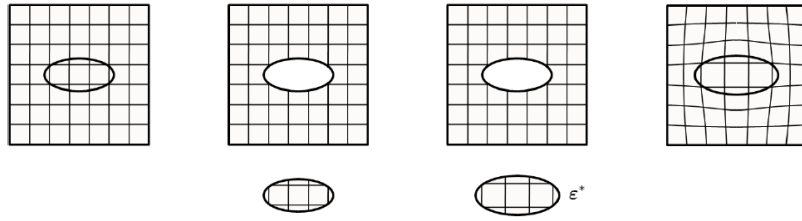


Figura 9: Representação do problema de Eshelby (24).

Eshelby descobriu que a deformação dentro do elipsoide é uniforme e está relacionada com a deformação através de:

$$\varepsilon(x) = \zeta(I, C_0) : \varepsilon, \quad \forall x \in (I) \quad (7)$$

Onde $\zeta(I, C_0)$ é o tensor de Eshelby e este depende de C_0 , da forma e orientação do elipsoide (I).

1.6.2 Problema de Inclusão simples

Um sólido infinito é sujeito a deslocamentos lineares nas suas fronteiras, que corresponde uma deformação uniforme E . O corpo é constituído por uma fase matriz de rigidez uniforme C_0 na qual está embebida um elipsoide (I) de rigidez uniforme C_1 . Usando a solução de Eshelby, este problema pode ser resolvido. Assim a deformação dentro da inclusão (I) é uniforme e está relacionada com E (26).

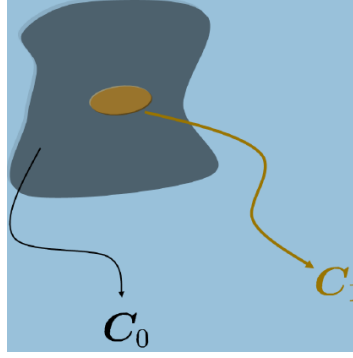


Figura 10: Representação do problema de Inclusão Simples (24).

$$\varepsilon(x) = H^\varepsilon(I, C_0, C_1) : E, \quad \forall x \in (I) \quad (8)$$

Onde H é o tensor de deformações da inclusão e é definido como:

$$H^\varepsilon(I, C_0, C_1) = \{I + \zeta(I, C_0) : C_0^{-1} : [C_1 - C_0]\}^{-1} \quad (9)$$

1.6.3 Modelo Mori-Tanaka

O trabalho de Mori e Tanaka originalmente estava ligado ao cálculo da tensão interna média na matriz de um material contendo inclusões com *eigenstrains* (27).

Como se pode ver na figura 11, este modelo aproxima o esquema inicial de inclusões a um esquema com uma simples inclusão que terá uma deformação média representativa do conjunto de inclusões. Verificou-se que o tensor de tensão que relaciona a média volumétrica das tensões das inclusões com as tensões da matriz, B^ε , é dado pela equação a seguir, que é exatamente igual ao tensor de tensões do problema de inclusão simples (26).

$$B^\varepsilon = H^\varepsilon(I, C_0, C_1) \quad (10)$$

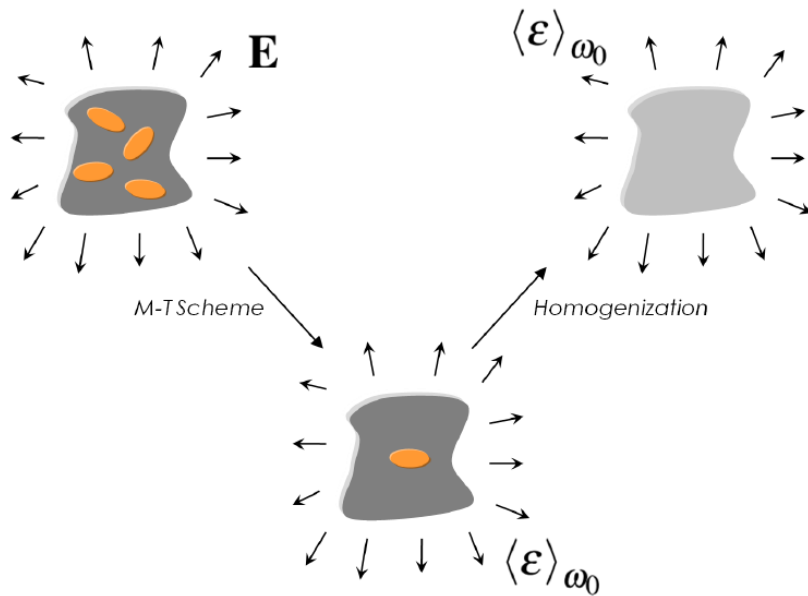


Figura 11: Esquema representativo do modelo Mori-Tanaka (24).

1.6.4 Modelo Dupla Inclusão

Este é baseado na ideia de que para cada inclusão existe uma matriz real que a rodeia (uma espécie de revestimento), enquanto que fora das inclusões existe uma rigidez média de referencia, C_r . Para cada fase existe uma rigidez correspondente e, alterando a rigidez C_r pode obter-se vários modelos distintos: o Modelo Auto Consistente (este assume que a inclusão está isolada da matriz, caso $C_r = C$ médio), Modelo Mori-Tanaka (caso $C_r = C_0$) ou o Mori-Tanka inverso (caso $C_r = C_1$), este é chamado assim pois corresponde ao modelo Mori-Tanaka de um compósito onde as propriedades do material das inclusões e da matriz são permutados. É importante ainda considerar que o modelo Auto Consistente normalmente leva a resultados errados, e por isso não está disponível no Digimat-MF (28) (29).

Segundo a pesquisa, o modelo de Dupla inclusão revela excelentes resultados em toda a gama de variáveis de análise do Digimat-MF, ao contrário do caso do modelo de Mori-Tanaka que apresenta excelentes resultados para percentagens de fibra inferiores a 25% mas que acima desse valor poderá não apresentar resultados com o mesmo grau de precisão (24).

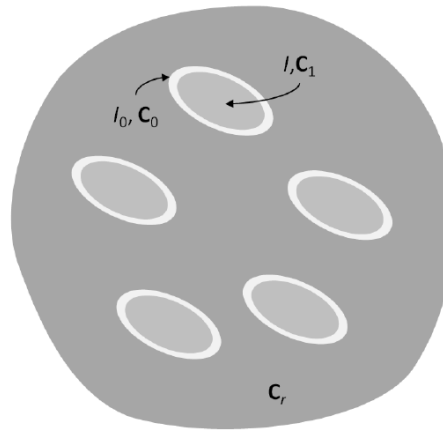


Figura 12: Esquema representativo do modelo de Dupla Inclusão (24).

1.7. Homogeneização de primeira e segunda ordem

Na homogeneização de primeira ordem o operador tangente de cada fase é calculado com a média volumétrica do campo de deformações da fase. Este valor médio é chamado de primeiro momento estatístico. Na homogeneização de segunda ordem utiliza-se não só o primeiro mas também o segundo momento estatístico para cada campo de deformações. O segundo momento estatístico está ligado à variância e enriquece a informação estatística em comparação com apenas um valor médio simples, (24).

O operador tangente é um “substituto” do módulo elástico. Contrariamente ao módulo elástico que é constante para cada fase, o operador tangente não é, à semelhança da tensão e da deformação que variam entre fases diferentes (isto para os casos de elasticidade não-linear, como o caso do modelo de elasticidade J2/Von Mises e o modelo de Drucker-Prager).

A aplicação atual do Digimat-MF mostra que, comparando com a homogeneização de primeira ordem, a homogeneização de segunda ordem traz uma melhoria significativa quando são satisfeitas três condições: (a) matriz reforçada com fibras, (b) grande diferença de rigidez entre matriz e fibra e (c) a matriz elasto-plástica exibe pouco “*hardening*”. Caso contrário, não se observam diferenças significativas entre os dois níveis de homogeneização (24).

1.8. Multi-inclusion homogenization

Uma possibilidade de estudo seria a utilização de diferentes tipos de inclusões num mesmo material. Para este caso é necessário aplicar métodos de homogeneização adaptados para estes problemas: “*Multi-step homogenization*” ou “*Multi-phase homogenization*”.

1.8.1 Multi-step homogenization

Nesta o RVE real é substituído por um modelo RVE simplificado constituído por um agregado de *pseudo-grains*, a este processo dá-se o nome de decomposição. Por definição, cada *pseudo-grain* é um compósito de duas fases contendo uma matriz e um conjunto de inclusões idênticas, tendo estas a mesma forma, relação de aspeto, orientação, modelo constitutivo e parâmetros do material.

O primeiro passo para homogeneizar O RVE simplificado consiste na homogeneização de cada *pseudo-grain* usando um modelo apropriado para compósitos básicos de duas fases, Mori-Tanaka ou Dupla Inclusão. No segundo passo, o comportamento de cada *pseudo-grain* homogeneizado é calculado através do modelo de Voigt (lei das misturas) (30) (31).

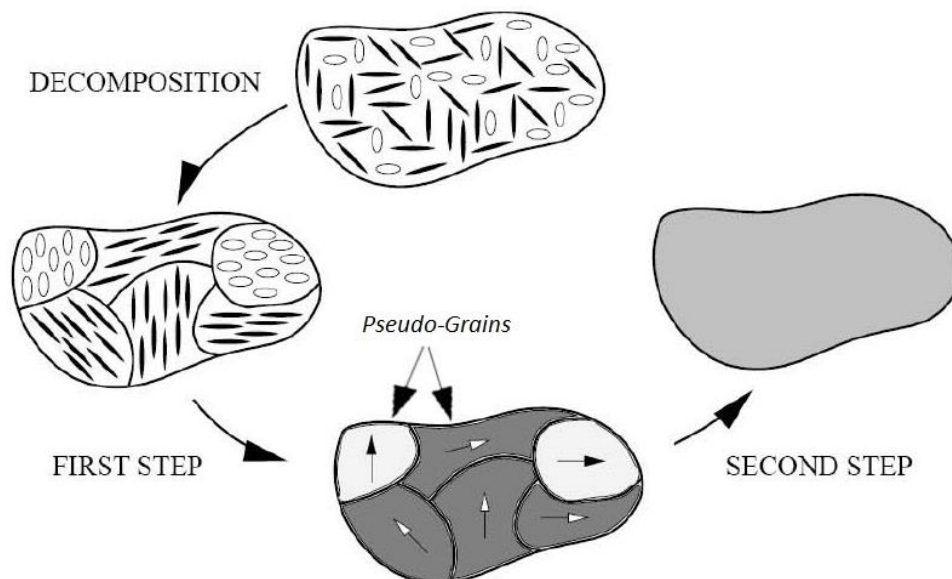
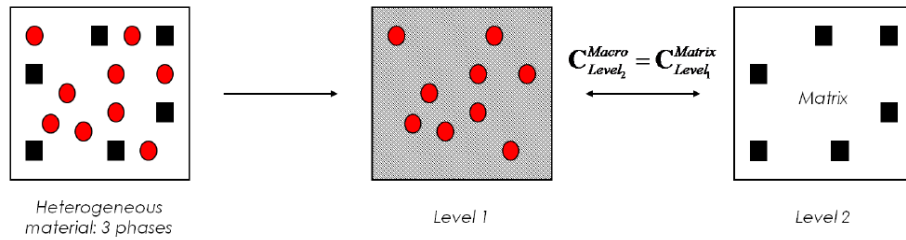
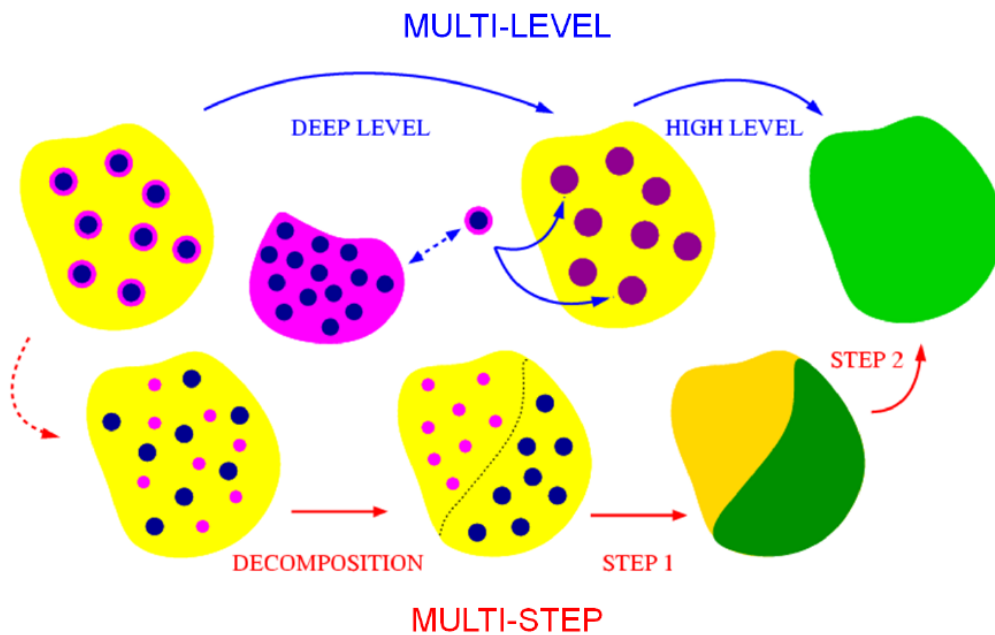


Figura 13: Esquema representativo do modelo de homogeneização *Multi-step* (30).

1.8.2 Multi-level homogenization

Neste método, em primeiro lugar a matriz é homogeneizada com um primeiro set de inclusões. O material assim obtido irá então ser considerado como matriz para outro set de inclusões, e assim sucessivamente. Para isto é usado o método Mori-Tanaka caso seja um caso de compósitos básicos de duas fases. Se em algum nível as inclusões estiverem desalinhas e são descritas por uma ODF ("*Orientation Distribution Function*"), então é utilizada uma homogeneização de dois passos Mori-Tanaka/Voigt (24).


 Figura 14: Esquema representativo do modelo de homogeneização *Multi-level* (24).

 Figura 15: Esquema comparativo dos modelos de homogeneização *Multi-level* e *Multi-step* (24).

1.9. Modelos de materiais

Como já foi referido, os casos estudados envolvem materiais heterogêneos constituídos por um material matriz e múltiplas inclusões/fibras. Juntamente com a homogeneização de campo médio, o Digimat-MF utiliza modelos de materiais de modo a modelar materiais o mais semelhantes à realidade a partir das suas propriedades, que são fornecidas pelo utilizador.

Existem vários modelos disponíveis para serem utilizados consoante as necessidades do utilizador: elasticidade, viscoelasticidade, hiperelasticidade, Elastoplasticidade, elastoviscoplasticidade, viscoelasticidade-viscoplasticidade. Destes apenas a Elastoplasticidade e a elasticidade forma utilizadas, já que revelaram uma excelente capacidade de previsão do comportamento do material sem serem demasiado complexos.

1.9.1 Elasticidade linear

Um material é considerado elástico quando este recupera a sua forma original uma vez removidas todas as cargas externas nele aplicadas, ou seja, mostra um comportamento "reversível" e não existem tensões residuais. Este é representado pela equação definida da seguinte forma:

$$\sigma = C : \varepsilon \quad (11)$$



Figura 16: Representação do comportamento elástico da fibra de vidro.

1.9.2 Elastoplasticidade Von Mises/J2 (24) (32)

Este envolve materiais que apresentem comportamento não linear a partir do momento em que a tensão ultrapassa o valor da tensão de cedência. A partir desta, se a carga for removida então será observada deformação permanente, ou seja, existirá deformação plástica. É importante também referir que este modelo não tem em conta as propriedades viscosas do material. Uma curva representativa deste modelo encontra-se representada na figura 17.

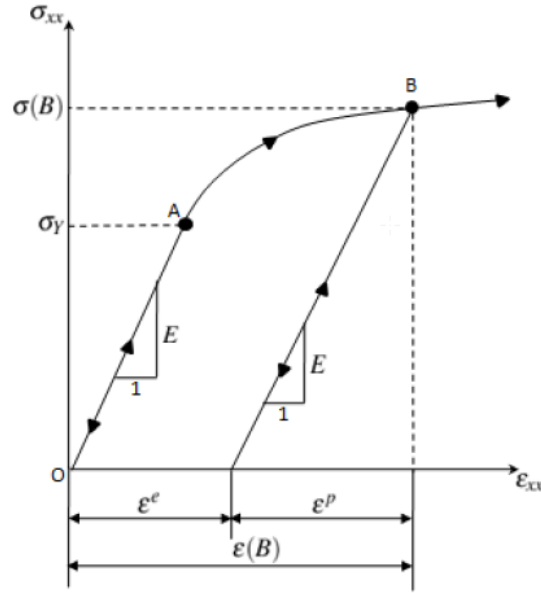


Figura 17: Curva representativa do modelo Von Mises/J2 (24).

O nome do modelo Von Mises/J2 surge devido à equação característica deste modelo que está representada a seguir. Onde J2 é designado de segunda invariante mecânica do tensor de tensões.

$$J_2(\sigma) = \frac{1}{2} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2] + 3[\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2] \quad (12)$$

Neste modelo, enquanto a tensão J2 for inferior à tensão de cedência o material comporta-se como sendo um elástico linear e respeita as equações do modelo elástico.

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (13)$$

$$\sigma = C : \varepsilon^e \quad (14)$$

A partir do momento que J2 ultrapassa o valor da tensão de cedência, σ_Y , a tensão de Cauchy passa a ser definida por:

$$\sigma_{eq} = \sigma_Y + R(p) \quad (15)$$

Onde $R(p)$ é chamada de tensão de *hardening* e p é a deformação plástica acumulada. Estes são calculados a partir das equações apresentadas a seguir. É importante ainda referir que a tensão de *hardening* pode ser calculada de maneiras diferentes, consoante a lei escolhida para o efeito.

$$\dot{p} = \left(\frac{2}{3} \varepsilon^p : \varepsilon^p \right)^{1/2} \quad (16)$$

Lei de potência: $R(p) = kp^m$ (17)

Lei exponencial: $R(p) = R_\infty [1 - \exp(-mp)]$ (18)

Lei exponencial e linear: $R(p) = kp + R_\infty [1 - \exp(-mp)]$ (19)

Onde:

m - Expoente de hardening

R_∞ - Módulo de hardening

k - Módulo linear de hardening

1.9.3 Plasticidade Drucker-Prager generalizada (24)

Este modelo, contrariamente ao modelo clássico de Elastoplasticidade Von Mises/J2, depende da pressão. Isto significa que leva em conta efeitos da pressão no regime plásticos (24).

O modelo Drucker-Prager é definido por uma superfície de cedência e por um potencial de fluxo, cujas equações estão representadas a seguir.

Superfície de cedência:

$$\Phi(\sigma_{eq}, \sigma_m, p) = M_\Phi \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_Y} \right)^q - H_\Phi \sigma_m - \sigma_t(p) \quad (20)$$

Potencial de fluxo:

$$G(\sigma_{eq}, \sigma_m) = \sqrt{[\xi \sigma_Y \tan(\phi)]^2 + \sigma_{eq}^2} - \sigma_m \tan(\phi) \quad (21)$$

Onde:

- $M_\phi > 0$ - Coeficiente de tensão de cedência
- $q > 0$ - Expoente da tensão de cedência
- $0 < H_\phi < 1$ - Coeficiente da pressão de cedência
- $\sigma_i(p)$ - Função de hardening
- ξ - Excentricidade
- φ - Ângulo de dilatação

A pressão hidrostática, σ_m , é definida da seguinte maneira:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{I}{3} \quad (22)$$

Onde I é o primeiro invariante da tensão.

A tensão equivalente (ou tensão de Von Mises) é calculada a partir de s , que é o tensor de tensões deviatório (*Deviatoric Stress tensor*).

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} s : s} \quad (23)$$

Com s a ser obtido a partir da subtração da tensão hidrostática ao tensor de tensões de Cauchy.

$$s = \sigma - \frac{I}{3} \quad (24)$$

Por fim, temos as equações de *hardening*, que consoante o tipo de carregamento terão equações diferentes. Estas equações estão representados a seguir.

Teste de tração:

$$\sigma_t(p) = M_\phi \left(\frac{\bar{\sigma}(p)}{\sigma_Y} \right) + H_\phi \frac{\bar{\sigma}(p)}{3} \quad (25)$$

Teste de compressão:

$$\sigma_t(p) = M_\phi \left(\frac{\bar{\sigma}(p)}{\sigma_Y} \right) - H_\phi \frac{\bar{\sigma}(p)}{3} \quad (26)$$

Teste de corte:

$$\sigma_t(p) = M_\phi \left(\frac{\bar{\sigma}(p)}{\sigma_Y/\sqrt{3}} \right)^1 \quad (27)$$

1.10. Ferramentas numéricas utilizadas

1.10.1 Digimat

As soluções Digimat são utilizadas por engenheiros CAE (*Computer-aided Engineering*), cientistas de materiais e especialistas em processos de fabrico de materiais compósitos de modo a prever com precisão o comportamento micromecânico não-linear de materiais compósitos multifásicos complexos e estruturas (PMC, RMC, MMC, nanocompósitos, etc...). Como uma ferramenta eficiente e preditiva, o Digimat ajuda os seus utilizadores a projetar e fabricar materiais compósitos inovadores e peças com grande eficiência em termos de tempo e custos. Atualmente, a comunidade Digimat está espalhada por todo o mundo, estando os seus principais clientes localizados na Europa, América e Ásia (24).

Na seguinte descrição de cada ferramenta do Digimat apenas serão descritas mais aprofundadamente as ferramentas que foram utilizadas neste projeto, nomeadamente Digimat-MF, Digimat-MAP e Digimat-RP.

1.10.1.1 Digimat-MF

O Digimat-MF é o módulo de “*Mean-Field Homogenization*” do conjunto de ferramentas Digimat. Este utiliza abordagens semi-analíticas baseadas na solução de Eshelby e no problema de inclusão simples de modo a calcular estimativas aproximadas, mas precisas, das médias volumétricas da tensão e deformação, ambas ao nível do RVE (*Representative Volume Element*), ou seja, a nível macrométrico). Uma aplicação típica desta ferramenta é modelar o comportamento linear e não-linear de peças injetadas cujo material é um termoplástico reforçado com fibra de vidro (24). Para isso o Digimat-MF utiliza a orientação das fibras, que é prevista pelo *software* de simulação do processo de injeção, e através do acoplamento com o *software* de análise estrutural irá servir como modelo micromecânico do material dentro deste.

Concluindo, o Digimat-MF é o responsável pela criação do material a utilizar no cálculo estrutural, para isso é necessário fornecer ao programa as propriedades dos materiais que fazem parte do compósito final, bem como a geometria, dimensões e fração volumétrica das fibras, método de homogeneização e os modelos de materiais (a orientação das fibras será tratada no Digimat-MAP).

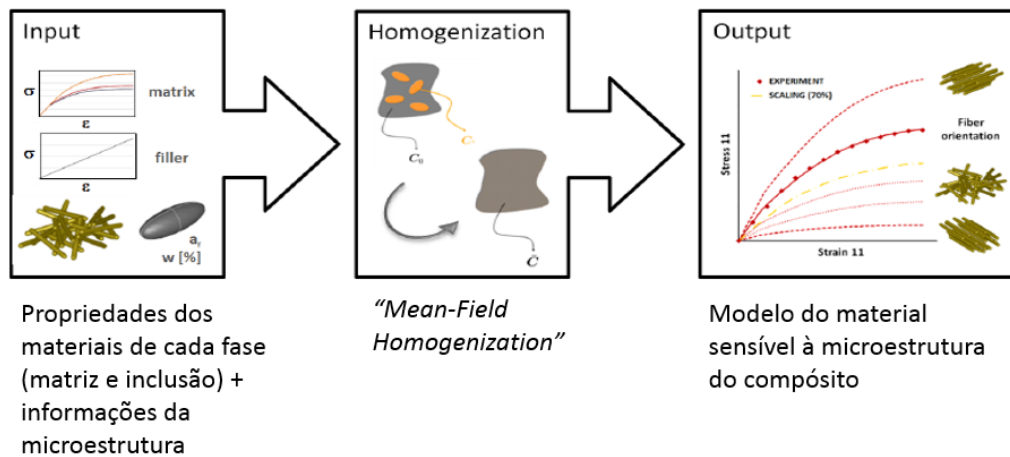


Figura 18: Ilustração do funcionamento da ferramenta Digimat-MF (24).

1.10.1.2 Digimat-FE

Este é um módulo baseado no método de elementos finitos, que tem como objetivo a criação de um RVE com uma microestrutura complexa e realista e fazer a análise através de *softwares* de análise de elementos finitos externos (24).

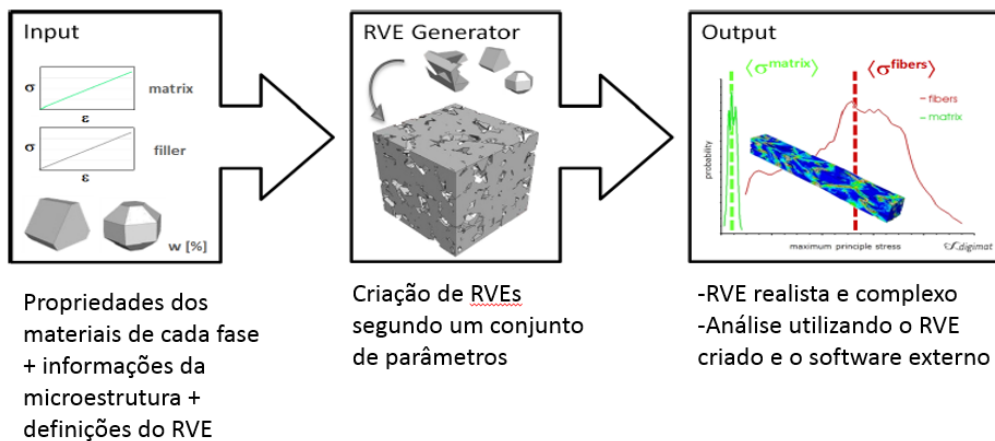


Figura 19: Ilustração do funcionamento da ferramenta Digimat-FE (24).

1.10.1.3 Digimat-MX

Este é um módulo que permite o acesso a bases de dados com modelos de materiais e análises já criadas, permitindo assim o aperfeiçoamento dos modelos criados pelo utilizador através de dados experimentais (24).

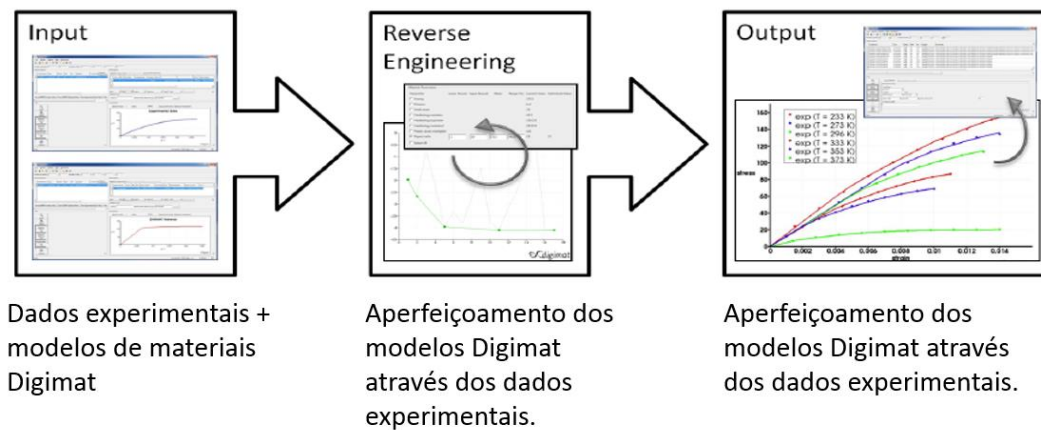


Figura 20: Ilustração do funcionamento da ferramenta Digimat-MX (24).

1.10.1.4 Digimat-CAE

Este módulo permite fazer a ligação entre *softwares* de simulação do processo de injeção e os softwares de análise de elementos finitos (neste caso MoldFlow e ABAQUS). Ou seja, utiliza as informações sobre o processamento, obtidas no MoldFlow, e as informações dos materiais, obtidas pela análise Digimat-MF, de modo a criar uma análise no ABAQUS o mais semelhante à realidade possível (24).

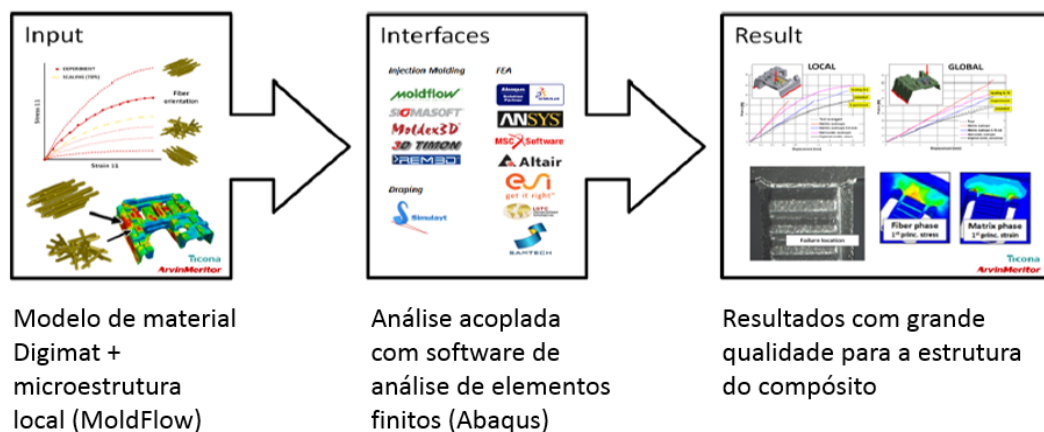


Figura 21: Ilustração do funcionamento da ferramenta Digimat-CAE. (2)

Existe um outro módulo do Digimat com funcionalidade semelhante, O Digimat-RP que será falado mais à frente, mas que devido a algumas limitações não poderá ser utilizado neste projeto. Assim, irá ser utilizado o Digimat-CAE com o objetivo de introduzir a orientação das fibras de reforço e as tensões residuais, calculadas utilizando o MoldFlow, na análise estrutural a ser executada no ABAQUS. Para isto é necessário introduzir o material criado no Digimat-MF e as respetivas orientações das fibras na análise do Digimat-CAE. Para além disso é necessário definir alguns parâmetros da análise:

- Interface

Permite escolher a interface gráfica que irá ser utilizada, que neste caso será o ABAQUS/Standard.

- Tensões iniciais

Permite optar se vão ser utilizadas tensões residuais ou não.

- Ficheiros de orientação das fases

Permite definir se as orientações serão utilizadas em termos de eixos globais ou em termos de eixos locais. O campo "ficheiros de orientação das fases" permite o uso de tensores de orientação vindos do Moldflow Midplane em eixos globais ou em eixos locais. Por predefinição, o MoldFlow dá os tensores de orientação em eixos globais, mas o Digimat permite convertê-los em eixos locais. Esta opção deve ser usada em análises de frequência. O segundo campo, "orientações usados em " é usado apenas quando são utilizados ficheiros de orientação do MoldFlow 3D. A predefinição para esta opção é "eixos locais". Ao definir esta opção como "eixos Globais" permite que evitar o uso de um ficheiro *.opt e do comando **ORIENTATION* no ficheiro *.inp do ABAQUS (24) (este passo será explicado com maior detalhe no ponto 4.3 Metodologias de acoplamento de *softwares's*).

- Orientação das inclusões

Nesta são definidos os ficheiros de orientação que serão utilizados na análise estrutural bem como a sua origem. Aqui pode ser escolhido o ficheiro exportado do MoldFlow, ou de outro *software* compatível, ou então utilizar um ficheiro do Digimat e assim identificar desde já o ficheiro com os dados mapeados no Digimat-MAP.

Por fim, executando a análise desta ferramenta são então criados os ficheiros necessários para execução da análise estrutural e que servirão mais tarde como *inputs* para o ABAQUS.

1.10.1.5 Digimat-MAP

Esta ferramenta surge devido ao facto de que, normalmente, a malha usada na simulação do processo e a malha usada na análise estrutural são diferentes. Através do MAP a malha dadora (vinda do MoldFlow) é otimizada e dá origem à malha recetora (que vais ser utilizada no ABAQUS)(24). Ou seja, este módulo de mapeamento tem como objetivo transmitir informação entre as malhas do processo e estrutural.

Então, para executar um mapeamento no Digimat-MAP é necessário fornecer a malha do processo, tratada como malha dadora, juntamente com a orientação das fibras, e a malha estrutural, tratada como malha recetora, de modo a mapear as orientações de uma para a outra.

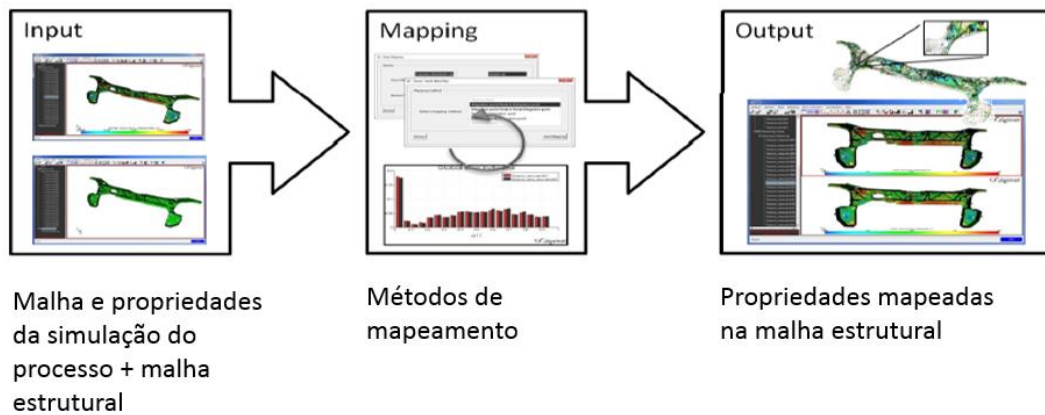


Figura 22: Ilustração do funcionamento da ferramenta Digimat-MAP (24).

No que toca à análise executada nesta ferramenta, é ainda necessário definir algumas condições que influenciam o mapeamento dos dados, que são o algoritmo de mapeamento e as tolerâncias.

- Algoritmo de mapeamento ("Integration point / Node to Integration point")

Este algoritmo é o mais recomendado para informação contida nos pontos de integração (como as tensões e orientações). Em primeiro lugar, os pontos de integração da malha recetora são localizados na malha dadora, e então a informação é mapeada a partir dos nós da malha dadora para os pontos de integração da malha recetora (24).

- Tolerâncias

Durante o processo de mapeamento, o algoritmo de mapeamento procura em que elemento da malha dadora está localizado o ponto/nó de integração da malha recetora. No entanto, os pontos de integração da malha recetora nem sempre estão dentro de um elemento da malha dadora. O parâmetro de tolerância é usado para verificar se o ponto de integração está realmente fora de um elemento ou se tem de ser considerado para outras operações de mapeamento com esse elemento.

Por definição, a tolerância é calculada automaticamente com base no tamanho médio do elemento da malha doadora. No entanto, se as malhas estão desalinhadas para além da tolerância calculada pela Digimat-MAP, este imprime uma mensagem de erro e termina. Nesse caso, o utilizador pode ajustar manualmente a tolerância (24).

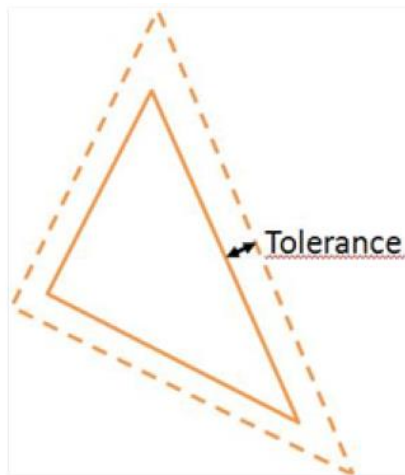


Figura 23: Exemplo de tolerâncias de uma peça (24).

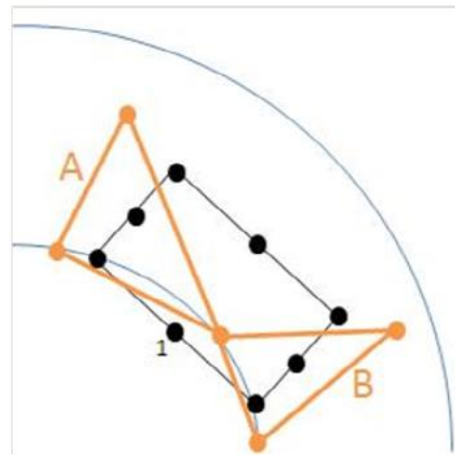


Figura 24: Exemplo do porquê da utilização de tolerâncias no mapeamento (24).

1.10.1.6 Digimat-RP

Este módulo tem uma função semelhante ao Digimat-CAE, fazer a ligação entre o *software* de simulação do processo e o software de análise estrutural. Contudo existem algumas diferenças entre estes, tais como uma visualização do problema e a realização da análise estrutural internamente no Digimat. No entanto, neste módulo apenas é possível utilizar as orientações das fibras como dados mapeados o que limita a sua utilização.

Nesta ferramenta do Digimat, existem três menus disponíveis, cada um com a sua função, que permitem importar os *inputs* necessários para correr a análise. Em primeiro lugar é necessário aceder ao menu “Modelo estrutural”, onde é possível importar a malha estrutural que contém também as cargas e condições de fronteira definidas no ABAQUS (ficheiro *.inp). O próximo Menu a aceder é o “Material Digimat”, onde é possível importar um material Digimat-MF criado anteriormente (ficheiro *.daf). Por último, no menu “Processo de manufatura” é possível importar as orientações (ou outros dados mapeados) para o modelo estrutural (ficheiro *.dof).

Após importar todos estes ficheiros é então possível executar a análise estrutural utilizando as cargas e condições definidas no ABAQUS. Quando a análise termina, os resultados são visualizados no ABAQUS. Existe também a possibilidade de correr a análise no ABAQUS e não internamente no Digimat (apesar do Digimat utilizar o ABAQUS para o cálculo).

1.10.2 MoldFlow

O MoldFlow é um *software* de simulação do processamento que tem como objetivo melhorar o projeto de moldes de injeção de plásticos e design da peça, bem como melhorar o processo de moldação por injeção. Fazer grandes produtos, reduzir preço de protótipos, evitar defeitos de fabrico e colocar os produtos no mercado mais rapidamente (33).

Este permite simular as várias fases do ciclo de moldação por injeção, enchimento, pressurização e arrefecimento. O objetivo deste *software* para este projeto é obter informações tais como orientação das fibras, tensões iniciais e temperaturas para incluí-las na análise estrutural.

1.10.3 ABAQUS

O conjunto de produtos ABAQUS Unified FEA oferece soluções poderosas e completas para os problemas de engenharia, desde os mais comuns aos mais sofisticados, cobrindo uma vasta gama de aplicações industriais. Na indústria automóvel, grupos de trabalho são capazes de considerar cargas em veículos completos, vibração dinâmica, sistemas de múltiplos corpos, impacto / colisão, acoplamento térmico estático não-linear, e acoplamento acústico-estrutural utilizando uma estrutura de dados com modelo comum e tecnologias de resolução integrada. Empresas de topo aproveitam o ABAQUS Unified FEA para consolidar os seus processos e ferramentas, reduzir custos e ineficiências, e ganhar vantagem competitiva (34).

O ABAQUS é essencialmente um conjunto de *softwares* de análise de elementos finitos constituído por cinco módulos:

- ABAQUS / CAE: módulo utilizado para a modelação e análise de componentes mecânicos e montagens e visualizar o resultado da análise de elementos finitos;
- ABAQUS / Standard: módulo de análise de elementos finitos de uso geral que utiliza esquemas de integração implícitos;
- ABAQUS / Explicit: módulo de análise de elementos finitos que utiliza esquemas de integração explícita para resolver sistemas altamente não-lineares com muitos contactos complexos sob cargas transientes;
- ABAQUS / CFD: módulo que fornece capacidades computacionais avançadas de dinâmica de fluidos, com amplo suporte para pré-processamento e pós-processamento previsto no ABAQUS / CAE.

- ABAQUS / eletromagnetic: módulo que resolve problemas computacionais eletromagnéticos avançados.

Capítulo II - Resultados experimentais

2.1. Processamento (Material, injetora e provete)

De modo a obter resultados para comparação foi necessário injetar provetes, cujas dimensões se encontram representadas na figura 25, de um polímero reforçado com fibra, neste caso polipropileno reforçado com fibra de vidro, de modo a estudar as capacidades do Digimat na criação de um modelo correto deste material.

Para a injeção dos provetes foi utilizada a injetora Ferromatik Elektra Evolution 110T e o polímero injetado foi o Sabic PP Compound G3230A (PP reforçado com 30% de fibra de vidro). De modo a aprofundar um pouco mais o estudo do programa, fez-se ainda variar algumas variáveis do processo. Neste caso considerou-se as variáveis apresentadas na tabela seguinte de acordo com o estudo descrito no estado da arte referente a estas variáveis.

Assim será utilizado o método de Taguchi de matriz L8 que corresponde ao estudo de três variáveis do processo.

- A- Temperatura do molde (26°C e 60°C)
- B- Temperatura do fundido (200°C e 260°C)
- C- Velocidade de injeção (50mm/s e 150mm/s)

Tabela 1: Variáveis do processamento.

Experiência	A	B	C
1	-	-	-
2	-	-	+
3	+	-	-
4	+	-	+
5	-	+	-
6	-	+	+
7	+	+	-
8	+	+	+

As temperaturas foram escolhidas tendo em conta a janela de processamento do polímero, 200°C–260°C para a temperatura do fundido tendo este uma temperatura de fusão igual a 230°C e 25°C–60°C para a temperatura do molde sendo a temperatura ideal de 40°C.

2.2. Ensaio de flexão

Para a análise comportamental dos provetes foi escolhido o teste de flexão de três pontos tendo em conta o caso de estudo escolhido para além da simulação dos provetes. De acordo com a funcionalidade da peça a analisar no caso de estudo final, revela-se importante o estudo do comportamento do material quando sujeito a cargas fletoras. Apesar de que o material, que será utilizado no caso de estudo, não ser o mesmo que o dos provetes, é interessante avaliar as capacidades da simulação acoplada para um caso de cargas fletoras.

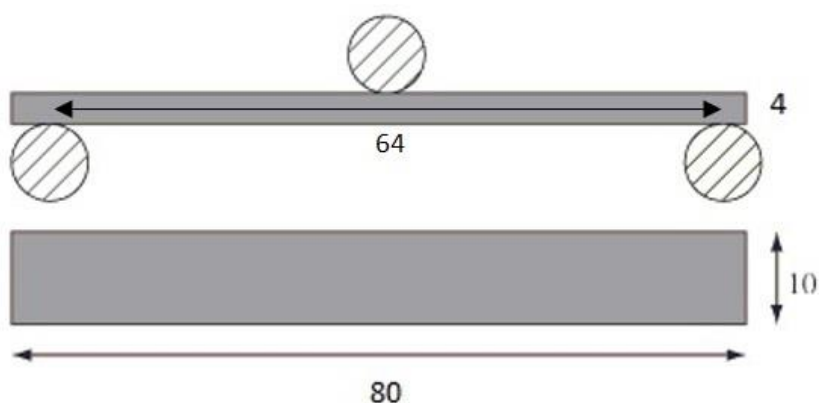


Figura 25: Esquema do teste de flexão de três pontos e dimensões do provete.

Realizando ensaios de flexão a estes provetes é possível estudar o comportamento do material através da curva tensão/deformação obtida e comparar com o comportamento simulado através da interface MoldFlow-Digimat-ABAQUS, onde é possível obter uma curva do material simulado. Na realização dos ensaios de flexão e na subsequente obtenção de resultados foi utilizada a norma ISO 178. Esta fornece informação relevante sobre as dimensões dos provetes e condições de teste mais indicadas.

Tabela 2: Resultados obtidos nos ensaios de flexão de três pontos

		Módulo elástico (MPa)	Tensão máx. (MPa)	Deslocamento máx. (%)
Condição 1	Média	5167,69	124,228	3,40604
	Desvio Padrão	71,8184	2,62575	0,13297
Condição 2	Média	5328,28	123,011	3,5049
	Desvio Padrão	211,373	3,18992	0,15958
Condição 3	Média	5181,56	124,219	3,38969
	Desvio Padrão	39,6234	1,26700	0,06631
Condição 4	Média	5088,26	123,184	3,42337
	Desvio Padrão	54,1550	1,90314	0,11854
Condição 5	Média	5356,90	129,389	3,36199
	Desvio Padrão	35,2976	0,66746	0,05305

Condição 6	Média	5374,74	130,283	3,42224
	Desvio Padrão	72,1655	2,24091	0,07857
Condição 7	Média	5262,25	128,702	3,33161
	Desvio Padrão	31,9082	2,38931	0,09100
Condição 8	Média	5222,27	126,595	3,35199
	Desvio Padrão	96,7673	1,32842	0,03211

Como já foi referido, o caso de estudo final envolverá a flexão de uma peça. Sendo assim, será importante analisar a influência das variáveis do processamento no módulo de elástico e na tensão máxima. Para isso utilizou-se o método de Taguchi de modo a analisar os resultados do ensaio e quantificar a influência das variáveis no comportamento mecânico do provete.

Tabela 3: Método de Taguchi.

	A	B	C	Módulo elástico (MPa)	Tensão máx. (MPa)
Condição 1	-	-	-	5167,69	124,228
Condição 2	-	-	+	5328,28	123,011
Condição 3	+	-	-	5181,56	124,219
Condição 4	+	-	+	5088,26	123,184
Condição 5	-	+	-	5356,9	129,389
Condição 6	-	+	+	5374,74	130,283
Condição 7	+	+	-	5262,25	128,702
Condição 8	+	+	+	5222,27	126,595

Tabela 4: Método de Taguchi: efeito das variáveis.

		A	B	C
Módulo Elástico	Média +	5188,585	5304,04	5253,3875
	Média -	5306,9025	5191,4475	5242,1
	Efeito	-118,3175	112,5925	11,2875
Tensão máxima	Média +	125,675	128,74225	125,76825
	Média -	126,72775	123,6605	126,6345
	Efeito	-1,05275	5,08175	-0,86625

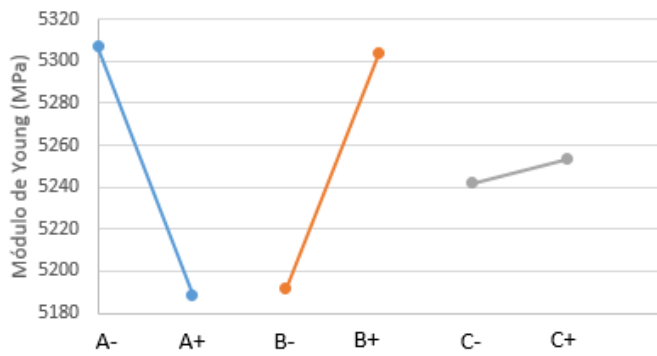


Figura 26: Efeito das variáveis no módulo de Young.

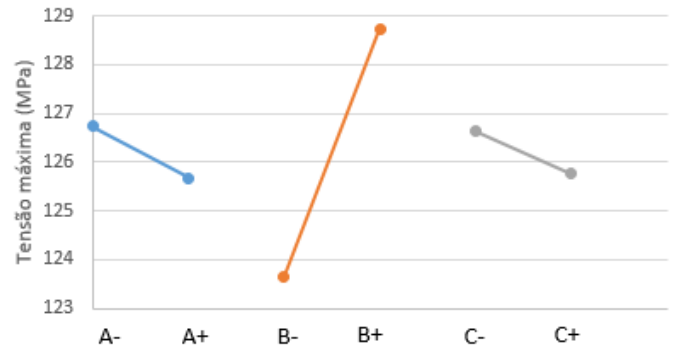


Figura 27: Efeito das variáveis na tensão máxima.

Analisando os resultados do método de Taguchi pode-se constatar que as temperaturas têm bastante maior influência sobre o módulo de Young do que a velocidade de injeção, que não exerce grande influência em ambos os resultados. No que toca à influência sobre a tensão máxima, a temperatura do fundido destaca-se das restantes variáveis, tornando-se assim na variável que mais influencia o comportamento mecânico da peça.

Poderá ainda concluir-se que o conjunto ótimo de fatores seria a utilização da temperatura do molde mais baixa (26°C), a temperatura do fundido mais elevada (260°C) e a velocidade de injeção mais elevada (150mm/s)

Capítulo III - Estudos preliminares

3.1. Objetivos

Com o intuito de aperfeiçoar a simulação acoplada foram realizados alguns estudos relacionados com o Digimat e com o modo de acoplar todos os *software's* utilizados. Assim foram realizados três estudos, um que envolve as capacidades de criação do material por parte do Digimat-MF, outro relacionada também com o Digimat-MF mas envolvendo as metodologias de homogeneização das fibras de reforço e por fim a um estudo acerca da melhor metodologia a adotar para acoplar os *software's*.

3.2. Metodologias de criação de material

Como já foi mencionado, no Digimat existem várias opções para o modelo de criação de material, Elastoplasticidade, hiperelasticidade, viscoelasticidade, entre outros.

Numa primeira fase optou-se pela utilização dos modelos de Elastoplasticidade para a modelação da matriz, já que representam de forma bastante satisfatória o comportamento mecânico de materiais plásticos. Dentro desta categoria de modelos existem dois principais, o modelo J2/Von Mises e o modelo de Drucker-Prager generalizado, ambos já descritos no capítulo da pesquisa bibliográfica. Para a modelação das inclusões foi utilizado o modelo de elasticidade simples, já que o comportamento das fibras de reforço corresponde ao descrito por este modelo.

Com o objetivo de determinar qual dos dois modelos de Elastoplasticidade seria o mais interessante utilizar foram realizadas algumas simulações de modo a compará-los.

De modo a realizar estas simulações, para o caso do modelo J2/Von Mises, foi necessário o estudo das três variáveis de *hardening*, que fazem parte das propriedades necessárias para a criação do material, para fazer o *fitting* da curva simulada à curva experimental. Isto porque se revelou bastante complicado encontrar informação sobre estes parâmetros do material nas bases de dados e na literatura pesquisada.

Através da execução das simulações não se constataram diferenças entre os dois modelos em termos de resultados mecânicos, no entanto a realização de simulações utilizando o modelo Drucker-Prager revelou-se bastante mais complexo. Isto devido ao facto de que, tendo em conta que para o modelo J2/Von Mises existem três propriedades com falta de informação, para o modelo Drucker-Prager existem seis propriedades cuja informação é escassa/inexistente. Assim, foi escolhido o modelo J2/Von Mises para a modelação da matriz polimérica.

No que toca ao estudo realizado com os parâmetros de *hardening* obtiveram-se os resultados representados nas figuras 28 e 29. No primeiro gráfico está representada a influência do expoente de *hardening*, m , e do módulo linear de *hardening*, k , porque através das simulações realizadas constatou-se que utilizar o mesmo valor para estes dois parâmetros se refletia numa curva mais próxima da experimental para o caso dos provetes. No segundo gráfico está representada a influência do módulo de *hardening*, R^∞ , no comportamento mecânico da peça.

Para além disso, foi utilizada como lei de *hardening* a lei exponencial e linear.

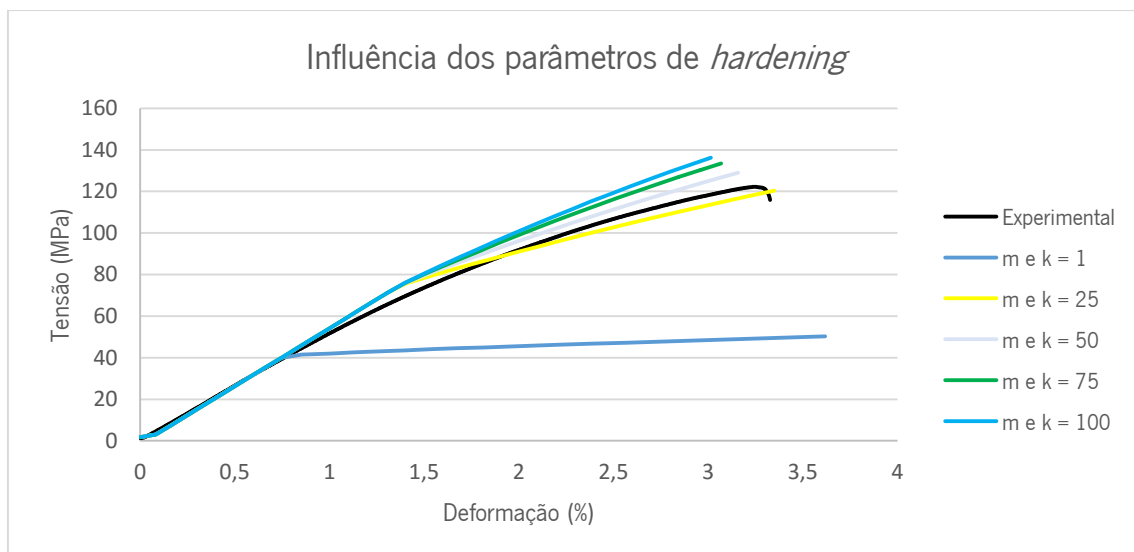


Figura 28: Influência do expoente de *hardening*, m , e do módulo linear de *hardening*, k .

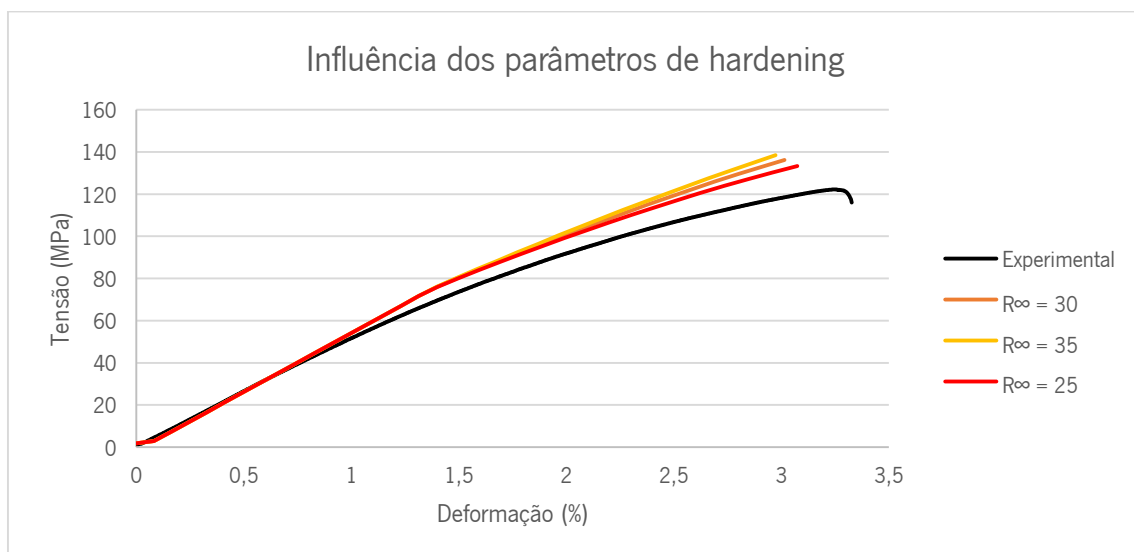


Figura 29: Influência do módulo de *hardening*, R^∞ .

Como podemos observar nos gráficos deste primeiro estudo, os melhores valores para o expoente de *hardening* e módulo linear de *hardening* seriam o 25 e o 50 e para o módulo de *hardening* seria o 25. No entanto, com os resultados do estudo da homogeneização de segunda ordem estes valores poderão não ser os melhores.

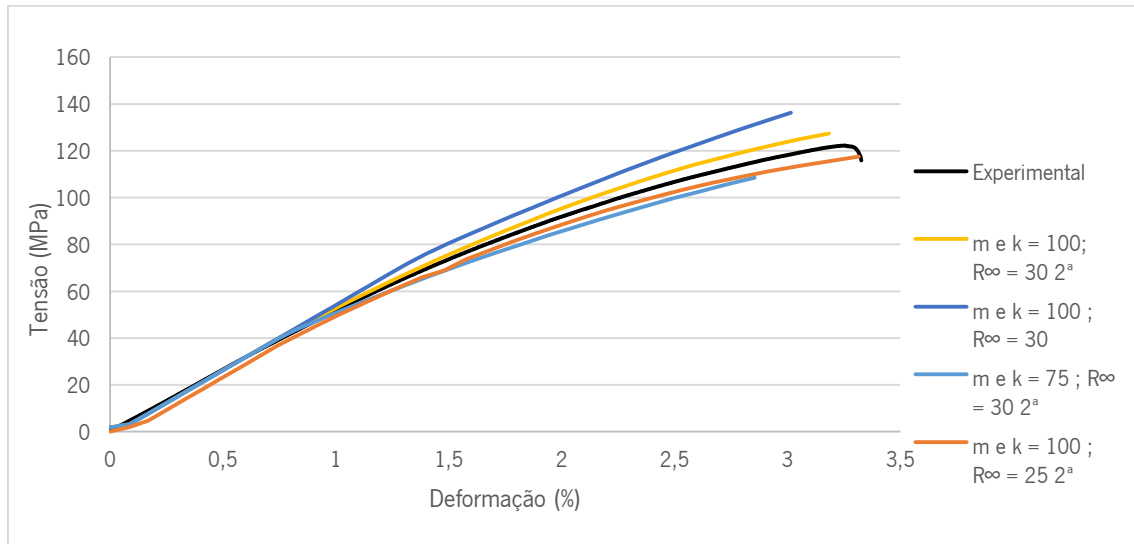


Figura 30: Influência da homogeneização de segunda ordem.

Com os resultados do estudo da influência da homogeneização de segunda ordem, apresentados na figura 30, observa-se que as opções escolhidas segundo o estudo anterior se alteram. Assim a melhor opção passa a ser utilizar o expoente de *hardening* e o módulo linear de *hardening* iguais a 100 e o módulo de *hardening* igual a 30.

Concluindo, segundo os estudos da criação do material será utilizado o modelo de Elastoplasticidade de J2/Von Mises para a modelação da matriz polimérica e o modelo de elasticidade simples para a modelação das fibras de reforço. Para além disso, será ainda utilizada a homogeneização de segunda ordem e serão atribuídos ao expoente de *hardening* e módulo linear de *hardening* o valor de 100 e ao módulo de *hardening* o valor de 30.

3.3. Metodologias de homogeneização

Existem duas metodologias possíveis de implementar no Digimat-MF no que toca à homogeneização das fibras de reforço, o modelo de Mori-Tanaka e o modelo de Dupla inclusão, que já foram referidos no capítulo da pesquisa bibliográfica.

Como foi referido, seria expectável que o modelo de dupla inclusão fosse mais preciso já que, no caso dos provetes, o material utilizado possui uma percentagem de fibra de 30%. No entanto,

embora os resultados sejam bastante semelhantes, segundo os resultados apresentados na figura 31 isto não acontece, sendo que o modelo de Mori-Tanaka apresenta resultados mais próximos da realidade experimental.

Em termos de tempo de simulação estrutural, o modelo de Dupla inclusão revela-se bastante mais demoroso do que o modelo de Mori-Tanaka, chegando a demorar, no caso dos provetes, cerca do dobro do tempo.

Outro fator chave para a escolha do modelo de homogeneização foi a opção de utilização da homogeneização de segunda ordem, que como é possível observar no ponto 4.1 apresenta resultados bastantes próximos dos resultados experimentais. Isto porque o modelo de Dupla Inclusão não permite a utilização desta opção o que limita um pouco a utilização deste modelo.

Por estes motivos será implementado o modelo de Mori-Tanaka na simulação dos provetes e no caso de estudo final.

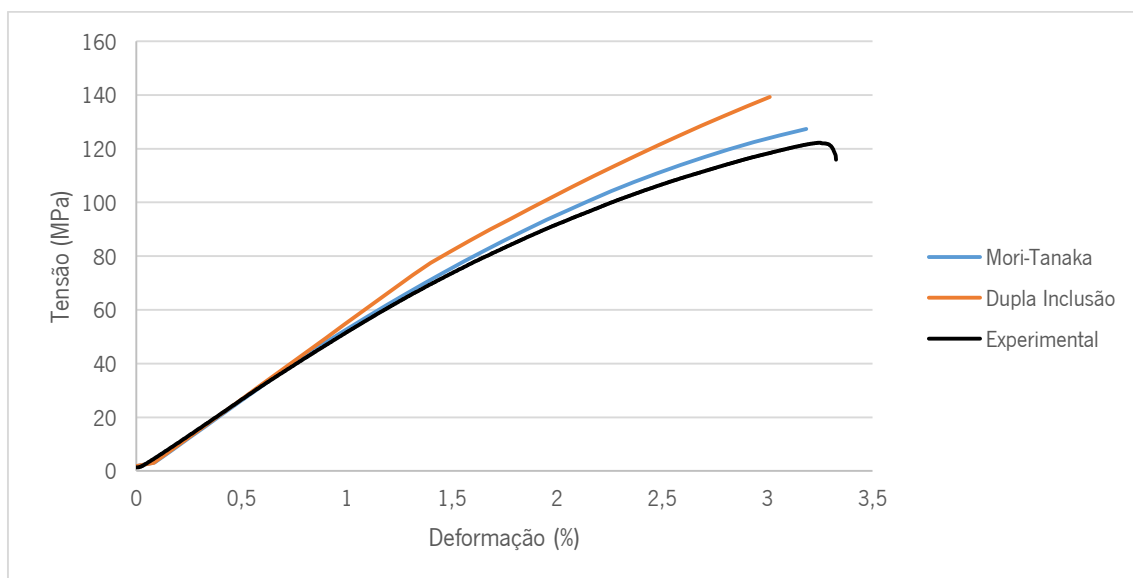


Figura 31: Gráfico de comparação entre modelo de Mori-Tanaka de Dupla Inclusão.

3.4. Metodologias de acoplamento de *softwares*

Um dos principais passos deste projeto era a definição de uma metodologia de acoplamento e utilização dos *softwares* com o objetivo técnico de obter resultados de comportamento mecânico virtuais (simulação) com influência de parâmetros de processo (injeção) para posterior comparação com resultados experimentais.

Estudou-se primeiramente a possibilidade de utilizar o Digimat-RP, que evitaria a necessidade de execução da análise estrutural no ABAQUS já que esta seria feita internamente no Digimat. No entanto, este módulo do Digimat não possui a capacidade de introduzir tensões residuais na análise, podendo apenas ter em conta as orientações. Assim, chegou-se à conclusão que a análise teria de ser feita através do Digimat-CAE.

A metodologia que foi criada e utilizada neste projeto está esquematicamente simplificada nas figuras 32 e 33, sendo que na figura 33 está um pouco mais detalhada. Na primeira podemos identificar as principais etapas e ideias para a realização da análise acoplada, a utilização do Digimat-MAP de modo a mapear as orientações das fibras e as tensões residuais da malha do processo para a malha estrutural, a modelação do material compósito no Digimat-MF, a utilização do Digimat-CAE de forma a embutir este material modelado e os dados mapeados na análise estrutural e execução desta no ABAQUS.

No entanto, alguns passos importantes não estão representados nesta esquematização e, por isso, encontra-se em anexo uma listagem mais detalhada da metodologia de acoplamento de *softwares*. Um destes passos é a modificação do ficheiro *.inp que possui extrema relevância na execução da análise. Este envolve a escrita da linha de comando “*INITIAL CONDITIONS, TYPE=STRESS, INPUT=FICHEIRO TENSÕES RESIDUAIS.str”, que ordena a importação do ficheiro *.str que contém as tensões residuais, e a adição do conteúdo do ficheiro *.aba, que permite a leitura do ficheiro *.mat do material através da subrotina do ABAQUS (estes dois ficheiros são outputs do Digimat-CAE). Sem estas alterações o ABAQUS daria erro e não seria possível executar a análise.

É importante frisar ainda que esta metodologia está adaptada para executar análises tendo em conta as orientações das fibras e as tensões residuais como dados mapeados oriundos da simulação de processo.

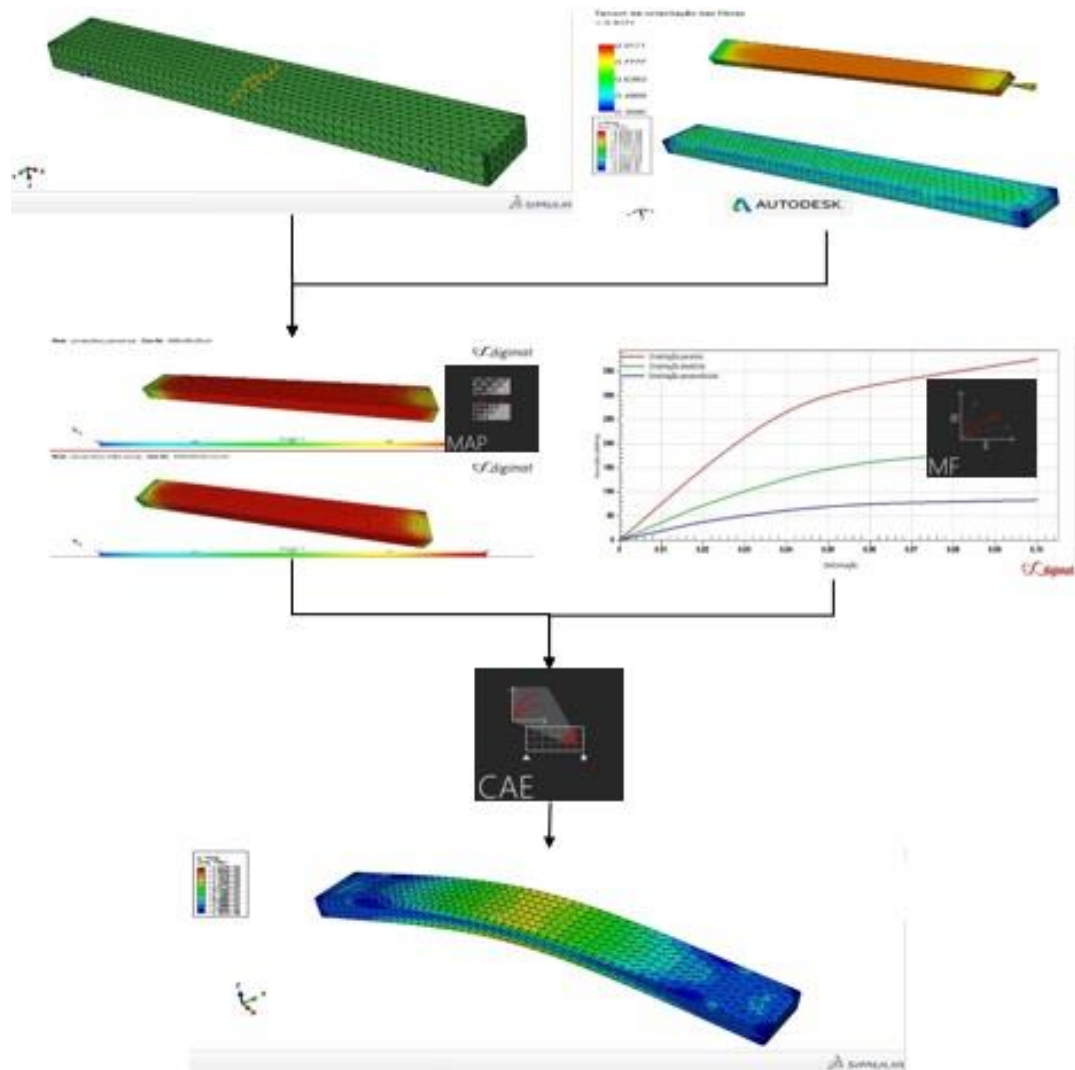
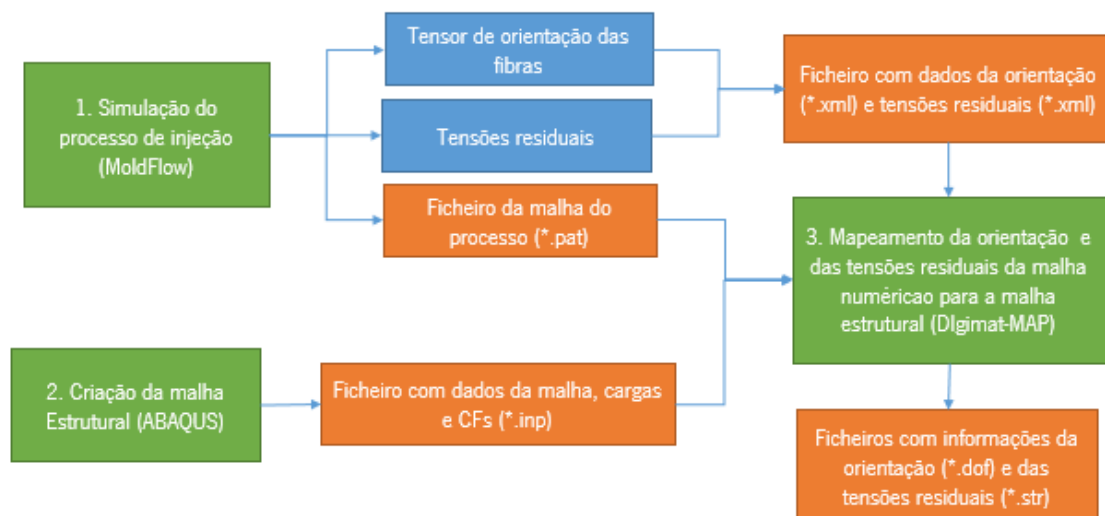


Figura 32: Metodologia de acoplamento de *softwares*.



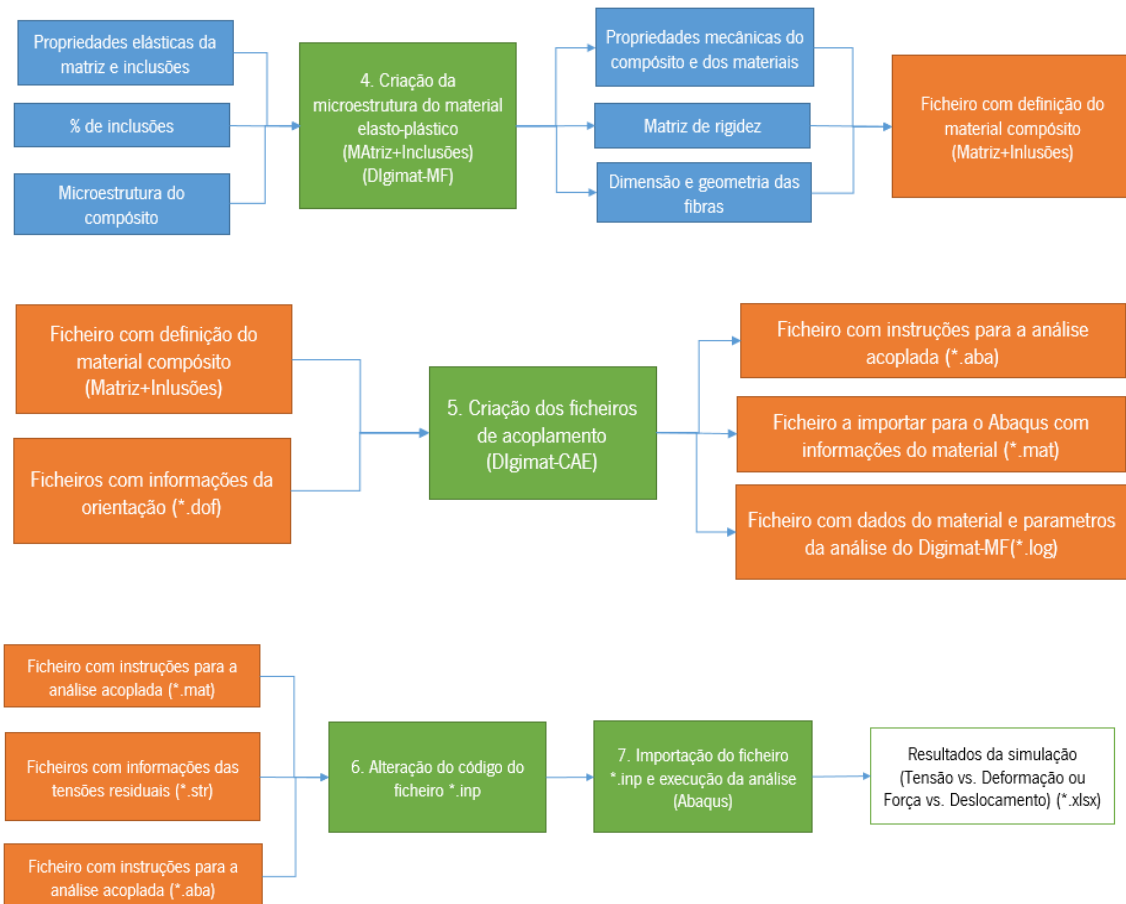


Figura 33: Metodologia de acoplamento de *softwares*.

Capítulo IV - Caso de estudo: Flexão

4.1. Simulação do processamento (MoldFlow)

O objetivo de utilização da simulação do processo (MoldFlow) neste projeto foi o de obter informação sobre o tensor de orientação das fibras e as tensões residuais correspondentes a cada elemento do provete. Desta forma, foi possível utilizar esta informação para estudar a influência da orientação local das fibras e das tensões residuais na análise do Digimat e estudar a capacidade do Digimat para estimar o comportamento mecânico do material e comparar com resultados obtidos experimentalmente.

As dimensões do modelo numérico seguem o esquema apresentado no capítulo 4. Este modelo utilizou ainda uma malha de elementos tetraédricos com aproximadamente 2mm de lado, apresentando 11413 elementos no total e três elementos segundo a espessura.

Quanto ao tipo de análise utilizada, foi definida como sendo do tipo *Cool + Fill + Pack*, ou seja, nesta foi estudado o enchimento, empacotamento e arrefecimento que são os processos que influenciam tanto a orientação das fibras como as tensões residuais.

4.1.1 Condições de processamentos

Ao nível das condições de processamento utilizadas nas simulações do processo, estas são iguais às utilizadas nas experiências práticas de injeção e seguem a metodologia de Taguchi. Foram variadas três condições do processamento, a temperatura do fundido, a temperatura do molde e a velocidade de injeção. Assim, as condições impostas foram as seguintes:

Tabela 5: Condições da simulação do processamento.

	Temperatura Fundido (°C)	Temperatura Molde (°C)	Velocidade Injeção (cm³/s)	Tempo ciclo (s)	Tempo Arrefecimento (s)
Ensaio 1	200	25	35	38.1	20
Ensaio 2	200	25	106	37.68	
Ensaio 3	200	60	35	38	
Ensaio 4	200	60	106	37.6	
Ensaio 5	260	25	35	41.9	
Ensaio 6	260	25	106	41.5	
Ensaio 7	260	60	35	42	
Ensaio 8	260	60	106	41.5	

Tendo em conta que foi estudado o arrefecimento dos provetes é importante referir que o sistema de arrefecimento utilizado era o mais semelhante possível ao presente no molde usado para a injeção experimental dos provetes.

4.1.2 Tensor de orientação das fibras

O resultado do tensor de orientação da fibra mostra o grau de orientação das fibras no final do processo de moldação por injeção. Este reflete a probabilidade de haver alinhamento das fibras na direção principal especificada. Uma grande probabilidade de alinhamento das fibras será indicada por um valor próximo de 1 na escala, enquanto que uma probabilidade baixa é indicada por um valor próximo de 0. (6)

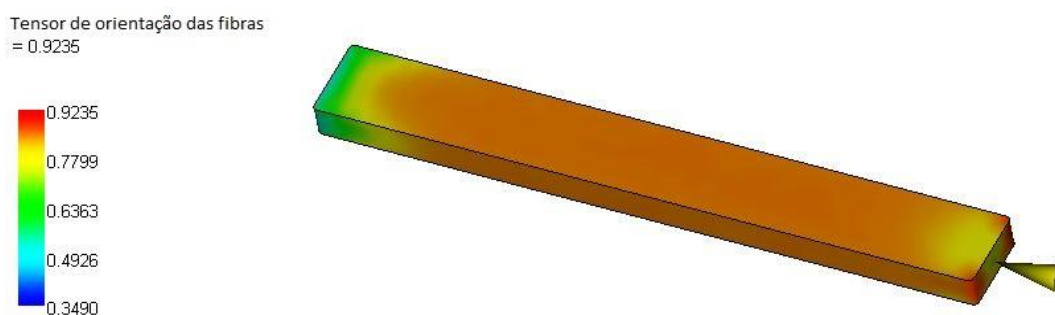


Figura 34: Resultados obtidos para o tensor de orientação das fibras para a condição 1.

Como seria espectável, o provete revela uma estrutura do tipo núcleo-casca, como pode ser constatado na figura 35, nos extremos do provete este revela uma grande orientação nos sentido do fluxo, enquanto que no centro não se encontra tão orientado.

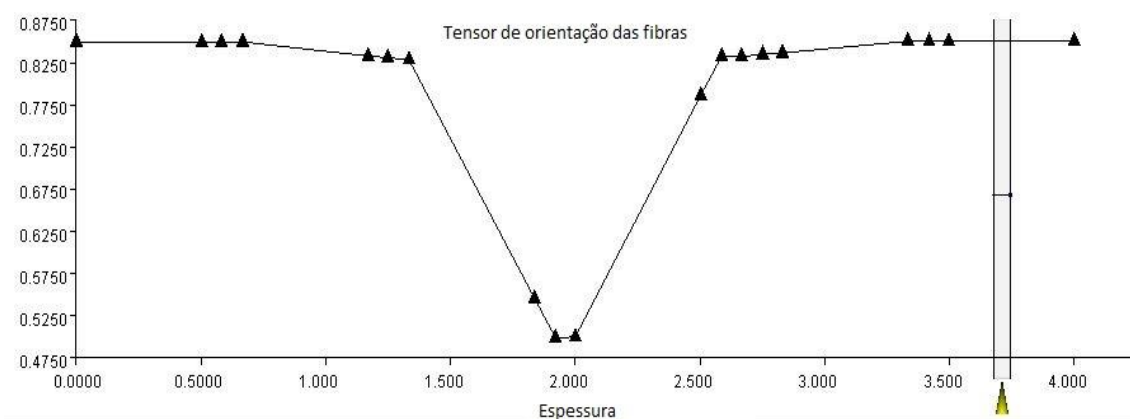


Figura 35: Evolução da orientação das fibras ao longo da espessura para a condição 1.

4.1.3 Tensões residuais

Ao contrário do tensor de orientação das fibras, as tensões residuais não podem ser observadas internamente no MoldFlow, isto porque este não é um resultado direto do MoldFlow e por isso é necessário correr uma macro para que estes resultados sejam exportados em forma de ficheiro *.xml. Assim, apenas será possível observar as tensões residuais executando uma análise estrutural no ABAQUS, que considerará estes dados como condições iniciais para a análise.

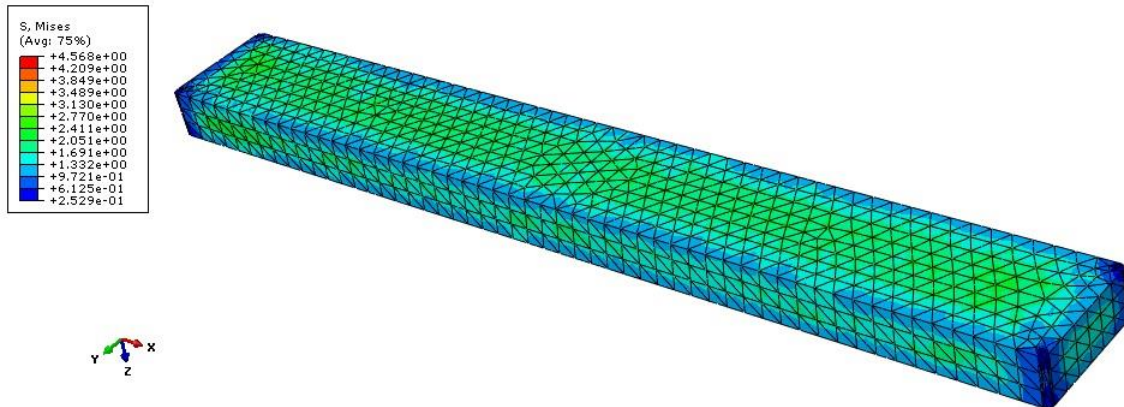


Figura 36: Resultados obtidos para as tensões residuais para a condição 1.

4.2. Simulação constitutiva do material (Digimat)

Como já foi referido em capítulos anteriores, para o caso estudado não é necessário utilizar todos os módulos do Digimat, apenas são necessários os módulos Digimat-MF, Digimat-MAP e Digimat-CAE.

Tendo em conta as ferramentas Digimat a utilizar, a única na qual é necessário definir *inputs* que não surgem de *outputs* de simulações (p.e. os ficheiros. inp, *.daf, *.dof) é o Digimat-MF. Os *inputs* necessários definir no Digimat-MF são:

- Propriedades dos materiais (matriz, fibra);
- Microestrutura (geometria da fibra, razão de aspeto (*aspect ratio*), fração mássica).

Através dos resultados representados no capítulo 5: Estudos preliminares, para a modelação do material foi utilizado o modelo de Mori-Tanaka para a homogeneização das inclusões e os modelos de materiais de Elastoplasticidade Von Mises/J2 e de Elasticidade que representam o comportamento do polímero e das inclusões respetivamente. Para estes é necessária informação

relativamente às propriedades e microestrutura dos diferentes componentes (matriz e fibra) que compõem o material compósito.

4.2.1 Digimat-MF

Como já foi referido, o este módulo tem como finalidade a criação do material a ser usado na análise estrutural, utilizando para isso ferramentas de homogeneização juntamente com as propriedades dos materiais que formam o compósito e a microestrutura deste.

De modo a modelar virtualmente o material final no Digimat-MF são necessárias as propriedades mecânicas da matriz e das fibras. A Informação utilizada teve por base a pesquisa bibliográfica e bases de dados de materiais.

Na tabela a seguir encontram-se as propriedades dos materiais (constituintes da matriz e das fibras) que foram necessárias considerar na modelação do material.

Tabela 6: Propriedades dos materiais utilizados

Propriedades	Matriz (PP)	Reforço (Fibra de vidro)
Densidade (g/cm ³)	0.92	2.54
Módulo de Young longitudinal (MPa)	1350	72000
Coefficiente de Poisson longitudinal	0.4	0.22
Tensão de cedência (MPa)	30	-
Módulo de <i>Hardening</i> (MPa)	30	-
Módulo de <i>Hardening</i> linear	100	
Expoente de <i>Hardening</i> (MPa)	100	-

Quanto à definição da microestrutura, seria ideal definir a fração mássica, a geometria e a orientação das fibras. A orientação das fibras é obtida através da simulação do processo no MoldFlow (mas é necessário definir uma orientação inicial no Digimat, mas que não irá ter influência na análise) e a fração mássica foi pré-definida na escolha do material. No entanto, não foi possível considerar a geometria específica das fibras, isto porque o próprio *software* não admite essa definição. Por defeito, o Digimat considera que existe uma aproximação da geometria da fibra a um esferoide. As fibras foram assim consideradas como sendo esferoides definidas apenas pela razão de aspeto (razão entre o comprimento e a largura do esferoide).

No entanto, esta aproximação é aceitável, já que um grande número de reforços encontrados em materiais compósitos pode ser modelado como sendo esferoide, incluindo partículas de enchimento, flocos, fibras curtas e fibras longas. (35)

Tabela 7: Definição da microestrutura.

Geometria das fibras	Esferoide
Fração mássica	0.3%
Razão de aspeto	25

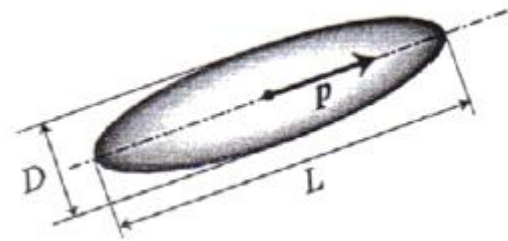


Figura 37: Representação de um esferoide.

Após a correta definição dos materiais e microestrutura é então possível fazer um “esboço” do material compósito criado. Isto porque, correndo a análise, é calculada a matriz de rigidez do material, as propriedades mecânicas do material compósito e gerada uma curva tensão/deformação representativa do material que não terão a influência do tensor de orientação das fibras real, que só será introduzido na análise estrutural através da utilização do Digimat-MAP e Digimat-CAE.

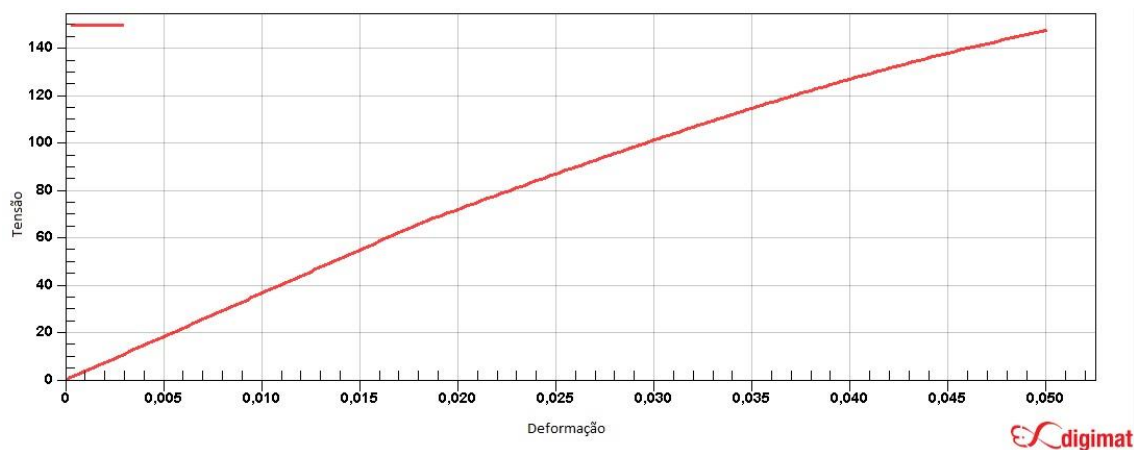


Figura 38: Curva tensão/deformação Digimat-MF.

4.2.2 Digimat-MAP

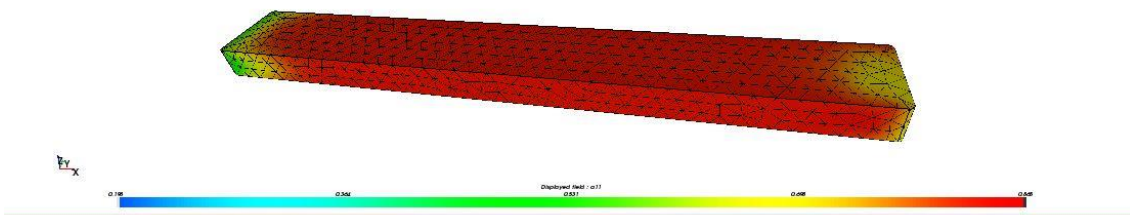
No Digimat-MAP será então realizado o mapeamento da orientação das fibras e das tensões residuais (*outputs* do MoldFlow) a partir da malha do processo para a malha estrutural. Esta ferramenta irá então criar dois ficheiros que conterão os dados mapeados, um ficheiro *.dof com as orientações das fibras e um ficheiro *.str com as tensões residuais. Para isso é necessário fazer duas análises separadas, já que o Digimat-MAP apenas consegue mapear um tipo de dados de

cada vez. Com base nestes ficheiros será então introduzida a influência da orientação das fibras e das tensões residuais no modelo numérico, introduzindo desta forma a influência do processo na análise estrutural.

Nas figuras 39 e 40, orientação das fibras e tensões residuais respetivamente, estão representados resultados das análises executadas da ferramenta Digimat-MAP, onde o provete na parte superior corresponde ao modelo do processo e o provete na parte inferior ao modelo numérico.

Mesh: provete_flexao_patmesh.pat , Data file: tf260tm60v150.xml

Digimat



Mesh: provete_flexao_malha_orfa.inp , Data file: tf260tm60v150_new.xml

Digimat

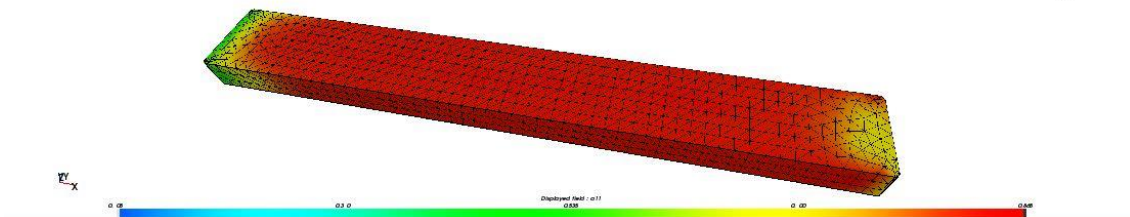
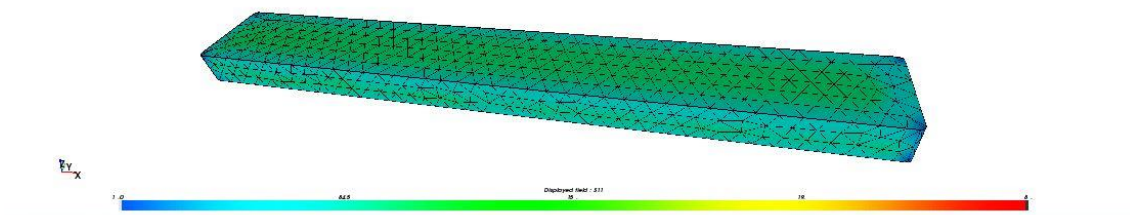


Figura 39: Resultado do mapeamento das orientações das fibras.

Mesh: provete_flexao_patmesh.pat , Data file: tf260tm60v150_initStresses.xml

Digimat



Mesh: provete_flexao_malha_orfa.inp , Data file: tf260tm60v150_initStresses_new.xml

Digimat

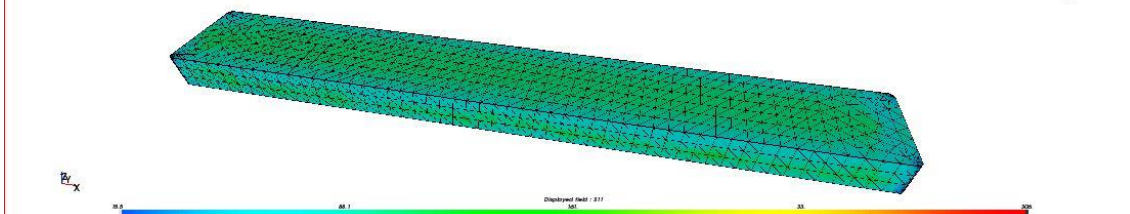


Figura 40: Resultados do mapeamento das tensões residuais.

4.2.3 Digimat-CAE

Para iniciar a análise no Digimat-CAE é necessário abrir o ficheiro do material do Digimat-MF já criado. Após importar o material é necessário definir alguns parâmetros para a análise, qual a interface gráfica que iremos usar, neste caso o ABAQUS/Standard, se pretendemos utilizar tensões residuais ou não e por fim qual o ficheiro que contém as orientações das fibras e qual a sua origem, que neste caso será o ficheiro com os dados mapeados criado no Digimat-MAP. Estes parâmetros foram descritos com maior pormenor no capítulo 2 (ferramentas numéricas utilizadas).

Executando a análise serão então criados três ficheiros de acoplamento:

- Ficheiro *.mat - que contém informação acerca do material do Digimat-MF e é o ficheiro que será importado para o ABAQUS;
- Ficheiro *.log – contém uma cópia da informação do material dados relacionados com a análise do Digimat-MF;
- Ficheiro *.aba- contém informação que será importante para a análise acoplada e terá de ser copiada para o ficheiro *.inp do ABAQUS.

4.3. Simulação estrutural (ABAQUS)

A simulação ABAQUS tem como objetivos principais obter o modelo com carregamentos mecânicos induzidos ao provete (idênticos ao experimental) e criar o modelo estrutural a ser utilizado como *input* no Digimat.

Esta possui duas fases. Na primeira é criado o modelo estrutural com carregamentos, condições fronteira (CFs) e malha estrutural, de modo a que seja possível executar o mapeamento dos dados exportados do MoldFlow para esta malha estrutural. Numa segunda fase o modelo estrutural criado é importado novamente para o ABAQUS, mas desta vez contém os dados referentes ao tensor de orientação das fibras e às tensões residuais e, assim, é possível executar uma análise estrutural realista.

De forma a criar as CFs e os carregamentos, necessários para simular um ensaio de flexão de três pontos, foram criadas algumas partições no provete, como podemos observar nas figuras 41 e 42. Estas partições foram criadas a partir das condições do ensaio de flexão, cuja imagem que o representa encontra-se ilustrada no capítulo 3.

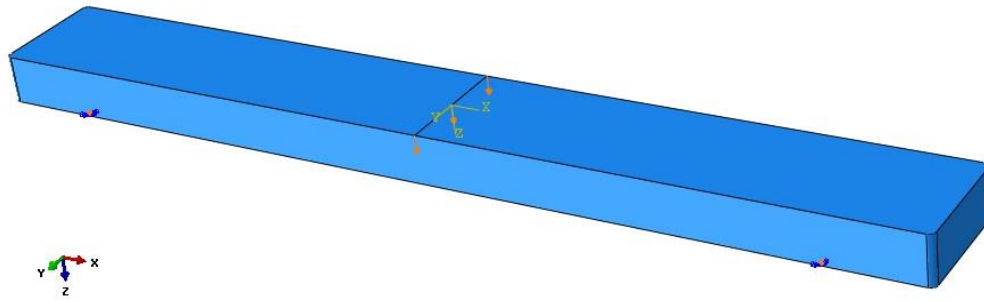


Figura 41: Representação do carregamento.

Na parte superior do provete, este foi dividido em duas partições. Na linha central, que divide o provete, foram aplicadas as cargas e definiu-se, de modo a ser o mais semelhante à realidade, como sendo uma carga definida segundo um deslocamento, que nos testes de flexão foi, em média, de 5.5mm.

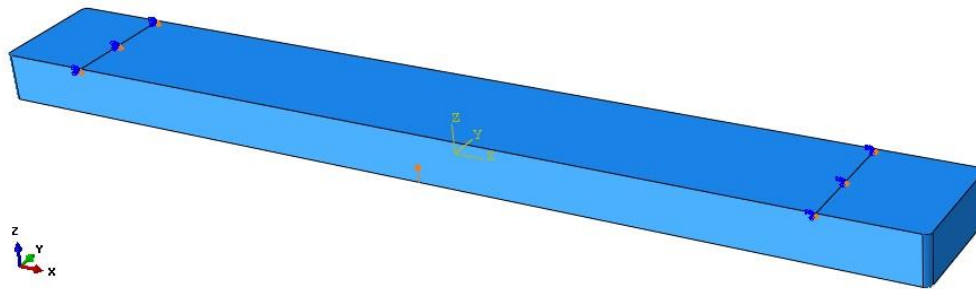


Figura 42: Representação das condições fronteira.

Na parte inferior do provete, este foi dividido em três zonas. Nas linhas que separam estas zonas foram aplicadas as condições fronteira, definindo-se estas de forma a impedir que o provete se desloca-se para baixo no sentido vertical (eixo do z 's) e de modo a evitar a existência de torção. Assim, foi definida a condição $U_3=U_{R1}=U_{R2}=0$ nestas linhas.

Nesta fase é importante também referir que no modelo numérico utilizou-se uma malha de elementos tetraédricos lineares com aproximadamente 1.5mm de lado, apresentando 8750 elementos no total.

Após a definição do modelo é realizada a escrita do ficheiro *.inp, que contém a informação sobre a malha estrutural do modelo, as CFs e as cargas aplicadas. Este ficheiro será posteriormente importado novamente para o ABAQUS, após sofrer as alterações necessárias no seu código, como já foi descrito no capítulo 4.

Posteriormente à realização da análise estrutural é então possível a obtenção das curvas tensão/deformação simuladas que já terão influência das condições de processamento previstas pelo ABAQUS e que serão comparadas com as curvas experimentais.

4.4. Resultados obtidos

Após a realização da análise numérica no ABAQUS, é gerado um ficheiro *.odb (ficheiro de resultados). Este é o ficheiro de *output* de resultados do ABAQUS, onde é possível observar os resultados obtidos, definidos anteriormente no Digimat. No trabalho desenvolvido, as informações mais relevantes são os valores de tensão, deformação e deslocamento (variável de verificação em função dos resultados experimentais). Assim, são apresentados os resultados obtidos no provete. A partir daqui foi possível obter a evolução ao longo do tempo destes resultados para cada elemento da malha representada, sendo possível obter os gráficos tensão/deformação necessários para a comparação com os resultados experimentais.

Para a obtenção das curvas foi utilizado sempre o mesmo elemento da malha (elemento n.º 4761), o qual se encontra identificado na figura 43 (zona central do provete).

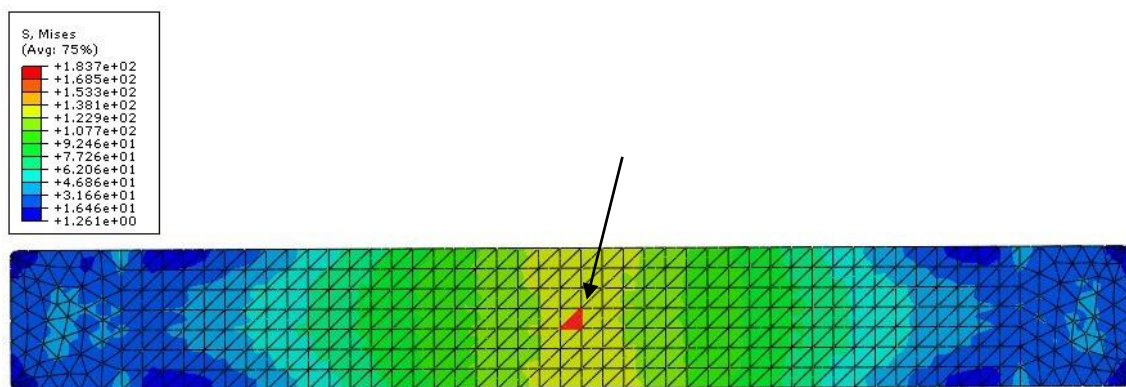


Figura 43: Representação do elemento utilizado para obter os valores da tensão e da deformação.

4.4.1 Simulação vs. Experimental

De modo a possibilitar uma comparação direta entre resultados experimentais e simulados, as curvas experimentais foram aproximadas a curvas médias para cada uma das condições. Assim, são apresentadas as curvas da caracterização experimental e do material modelado (simulado), que representam especificamente os resultados obtidos experimentalmente e os resultados obtidos através da simulação acoplada para cada condição de processamento utilizada.

■ Simulado
■ Experimental

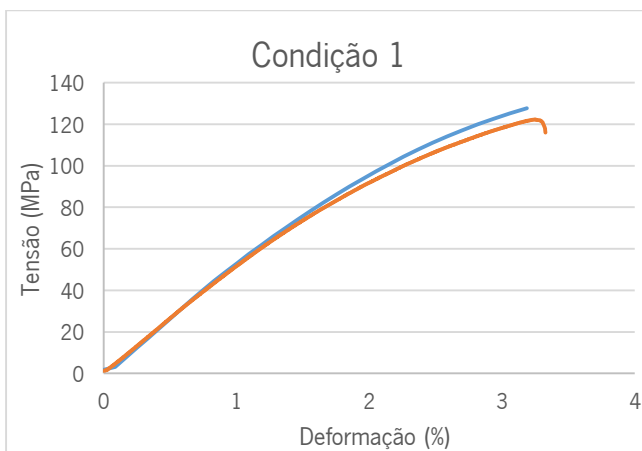


Figura 44: Comparação simulado vs. Experimental, condição 1.

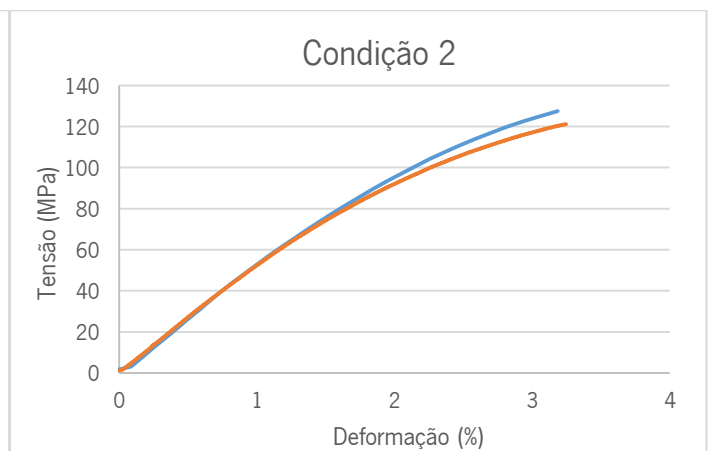


Figura 45: Comparação simulado vs. Experimental, condição 2.

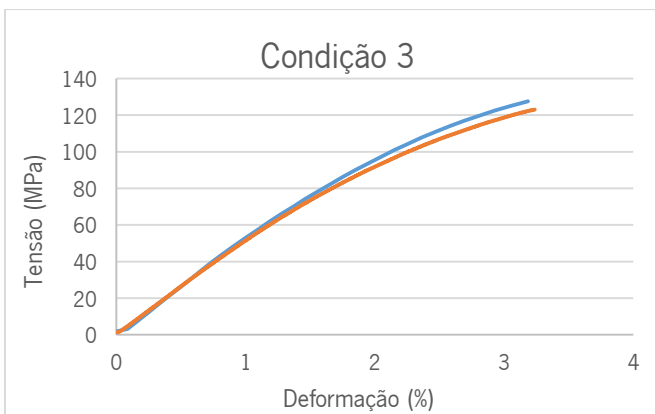


Figura 46: Comparação simulado vs. Experimental, condição 3.

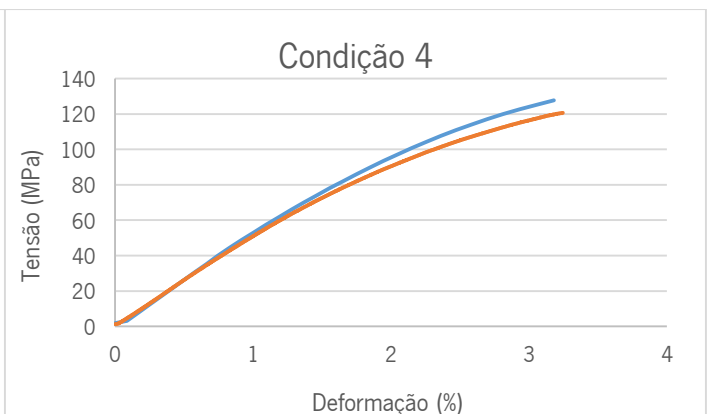


Figura 47: Comparação simulado vs. Experimental, condição 4.

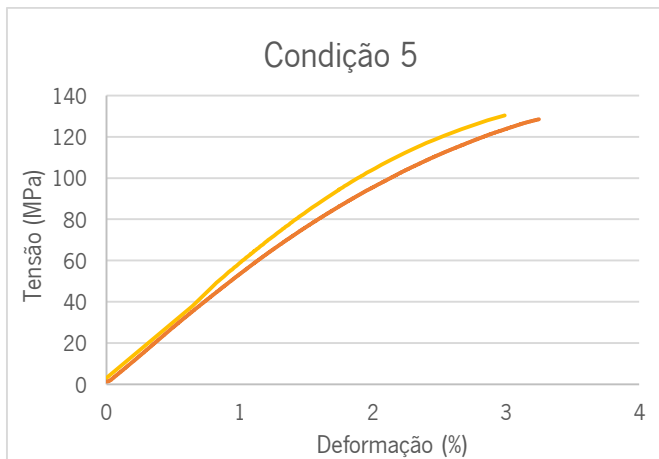


Figura 48: Comparação simulado vs. Experimental, condição 5.

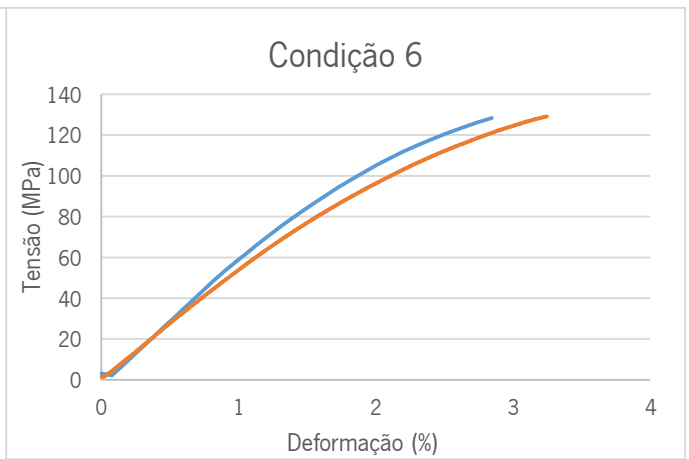


Figura 49: Comparação simulado vs. Experimental, condição 6.

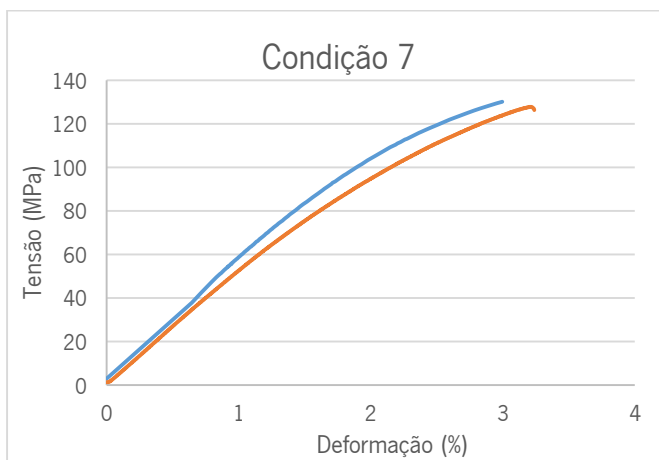


Figura 50: Comparação simulado vs. Experimental, condição 7.

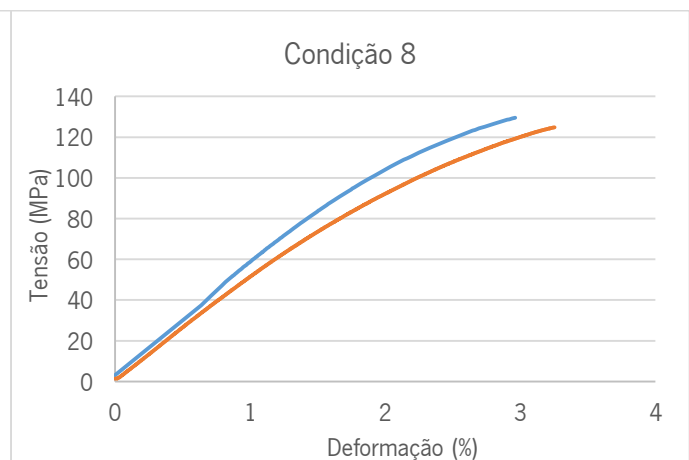


Figura 51: Comparação simulado vs. Experimental, condição 8.

Tabela 8: Resultados simulados vs. experimental

Condição		Módulo elástico (MPa)	Tensão máx. (MPa)	Deformação máx. (%)
1	Simulado	5092,16	127,605	3,18621
	Experimental	5167,69	124,228	3,40604
2	Simulado	5077,635	127,409	3,18518
	Experimental	5328,28	123,011	3,5049
3	Simulado	5092,555	127,591	3,18442
	Experimental	5181,56	124,219	3,38969
4	Simulado	5078,346	127,619	3,18245
	Experimental	5088,26	123,184	3,42337
5	Simulado	5563,779	130,396	2,99042
	Experimental	5356,9	129,389	125,982
6	Simulado	5517,055	128,362	2,84599
	Experimental	5374,74	130,283	3,42224
7	Simulado	5562,118	130,108	2,99471
	Experimental	5262,25	128,702	3,33161
8	Simulado	5508,721	129,597	2,96349
	Experimental	5222,27	126,595	3,35199

Como é possível observar nos gráficos apresentados, os resultados obtidos através da simulação acoplada estão relativamente próximos da realidade experimental para todos os casos estudados. Na tabela 8 podemos ainda verificar de uma forma mais exata as diferenças entre os resultados simulados e os experimentais.

Podemos então afirmar que as metodologias estudadas no capítulo 4 (Estudos preliminares) são válidas, para as condições, parâmetros e materiais utilizados, e ainda que apresentam resultados bastante satisfatórios. Assim, será válida a aplicação destas metodologias num caso de estudo mais complexo, onde será expectável o mesmo grau de precisão nos resultados simulados obtidos.

4.4.2 Influência das variáveis do processamento

Com o objetivo de haver uma melhor compreensão da influência de cada uma das variáveis do processamento na simulação acoplada foi também utilizado o método de Taguchi de modo a quantificar esta influência, mas desta vez utilizando os resultados simulados. Sendo possível assim, a comparação de resultados do método de Taguchi experimental e simulado e uma melhor percepção das diferenças entre realidade e simulação no que toca ao efeito das variáveis do processamento no comportamento mecânico do material.

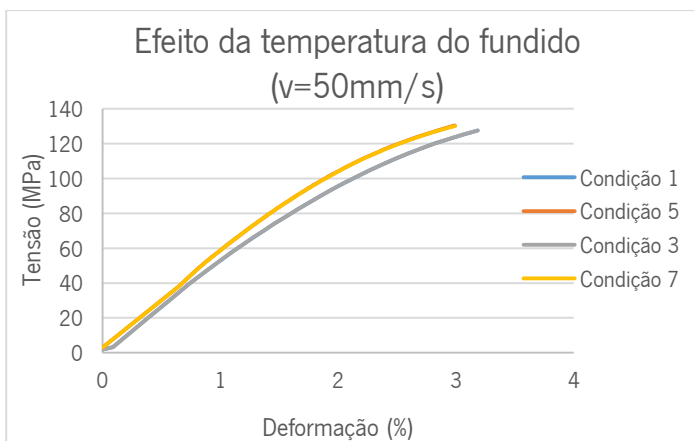


Figura 52: Efeito da temperatura do fundido nas curvas simuladas para uma velocidade de 50mm/s. Condições 1 e 3, 5 e 7 sobrepostas.

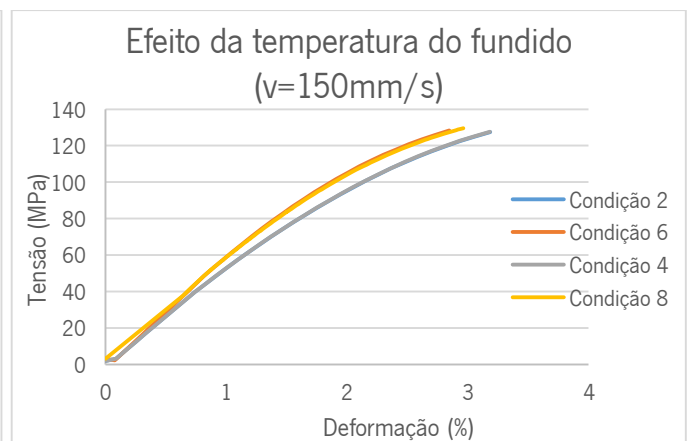


Figura 53: Efeito da temperatura do fundido nas curvas simuladas para uma velocidade de 150mm/s. Condições 6 e 8, 2 e 4 sobrepostas.

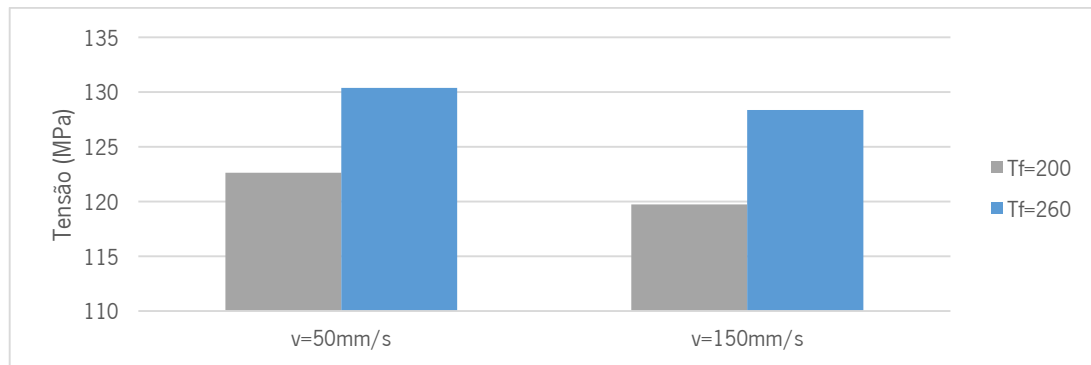


Figura 54: Influência da temperatura do fundido nas curvas simuladas.

Para o caso da temperatura do fundido é apresentado um gráfico de barras de forma a possibilitar uma melhor perceção dos resultados. Isto foi feito apenas para este caso já que, para as restantes variáveis, os resultados não apresentam diferenças significativas, como podemos observar nos gráficos 55, 56, 57 e 58.

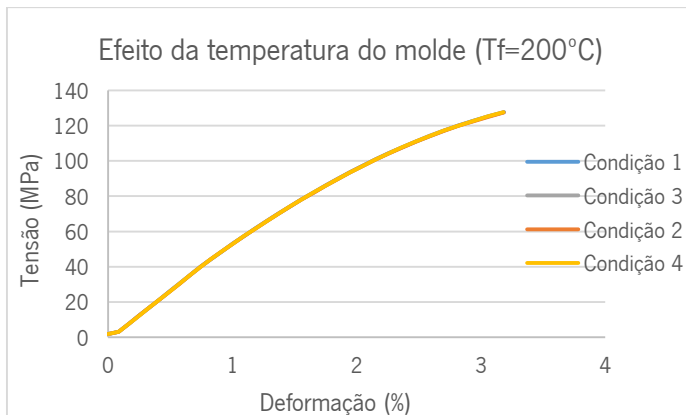


Figura 55: Efeito da temperatura do fundido nas curvas simuladas para uma temperatura do fundido de 200°C.

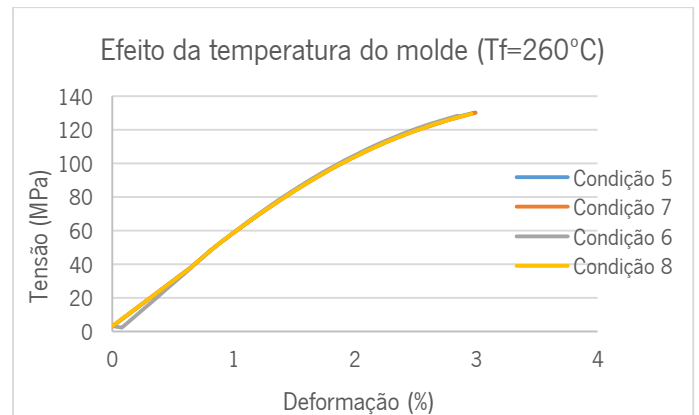


Figura 56: Efeito da temperatura do fundido nas curvas simuladas para uma temperatura do fundido de 260°C.

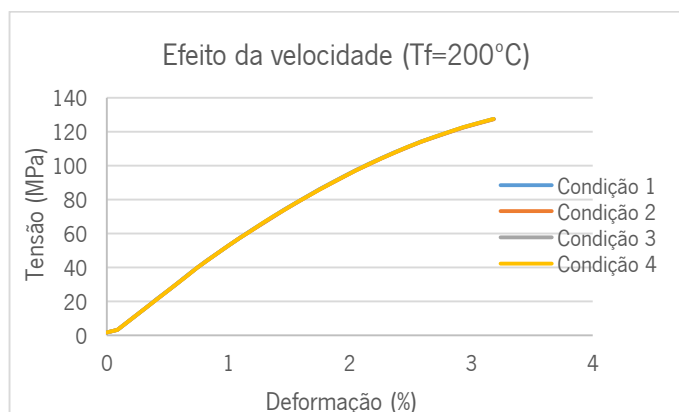


Figura 57: Efeito da velocidade nas curvas simuladas para uma temperatura do fundido de 200°C.

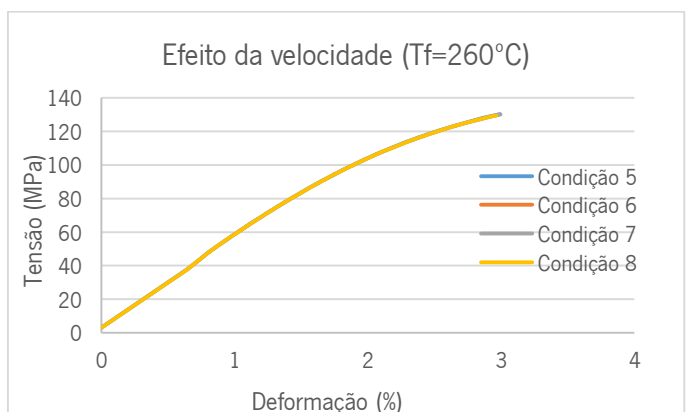


Figura 58: Efeito da velocidade nas curvas simuladas para uma temperatura do fundido de 260°C.

- A- Temperatura do molde (25°C e 60°C)
- B- Temperatura do fundido (200°C e 260°C)
- C- Velocidade de injeção (50mm/s e 150mm/s)

Tabela 9: Método de Taguchi dos resultados simulados.

	A	B	C	Módulo elástico (MPa)	Tensão máx. (MPa)
Condição 1	-	-	-	5092,16	127,605
Condição 2	-	-	+	5077,635	127,409
Condição 3	+	-	-	5092,555	127,591
Condição 4	+	-	+	5078,346	127,619
Condição 5	-	+	-	5563,779	130,396
Condição 6	-	+	+	5517,055	128,362
Condição 7	+	+	-	5562,118	130,108
Condição 8	+	+	+	5508,721	129,597

Tabela 10: Método de Taguchi: Efeito das variáveis.

		A	B	C
Módulo Elástico	Média +	5310,435	5537,91825	5295,43925
	Média -	5312,65725	5085,174	5327,653
	Efeito	-2,22225	452,74425	-32,21375
Tensão máxima	Média +	128,72875	129,61575	128,24675
	Média -	128,443	127,556	128,925
	Efeito	0,28575	2,05975	-0,67825

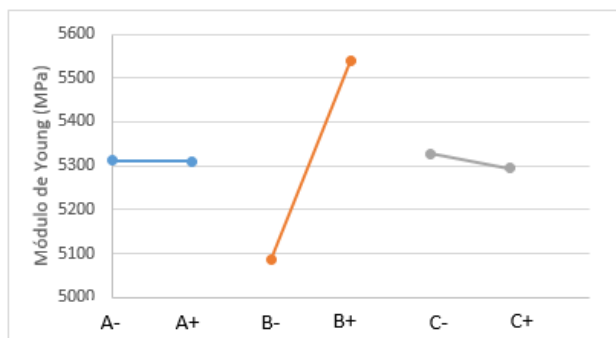


Figura 59: Efeito das variáveis no módulo de Young.

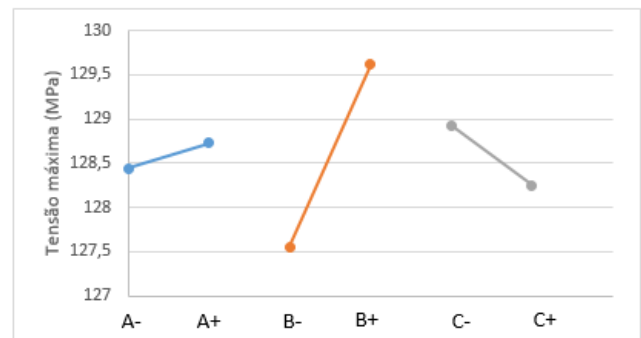


Figura 60: Efeito das variáveis no módulo de Young.

Pelo que podemos observar, existem algumas diferenças quanto à influência das variáveis do processamento quando comparamos os resultados do método de Taguchi dos resultados experimentais e o dos resultados simulados. A principal diferença encontra-se na temperatura do molde, que no caso experimental revelava elevada influência no módulo de Young e, no caso simulado, esta variável praticamente não possui influência sobre o módulo. Outra diferença a destacar é o efeito da velocidade, que no caso experimental tendia a elevar o módulo de young e

a tensão máxima, enquanto que no caso simulado tende a diminuir estas propriedades, embora neste caso a influência não seja muito significativa. Finalmente, ambos os casos (simulado e experimental) demonstram similaridade na influência da temperatura do fundido que se revela em ambos como a variável que mais influencia os resultados.

4.4.3 Influência dos dados mapeados

Nesta fase é importante clarificar também a influência do tensor de orientação das fibras e das tensões residuais na simulação acoplada.

Em primeiro lugar, é relevante mencionar uma funcionalidade do Digimat-MF que permite definir uma orientação das fibras pré definida. Esta permite, entre outras opções, definir uma orientação no sentido longitudinal, ou seja, no sentido do fluxo do provete que foi utilizada como comparação no gráfico da figura 61. Para este caso comparativo não foi utilizada a orientação simulada no MoldFlow, mas sim esta orientação definida no Digimat-MF de modo a visualizar o efeito da utilização de uma orientação pré definida e irrealista.

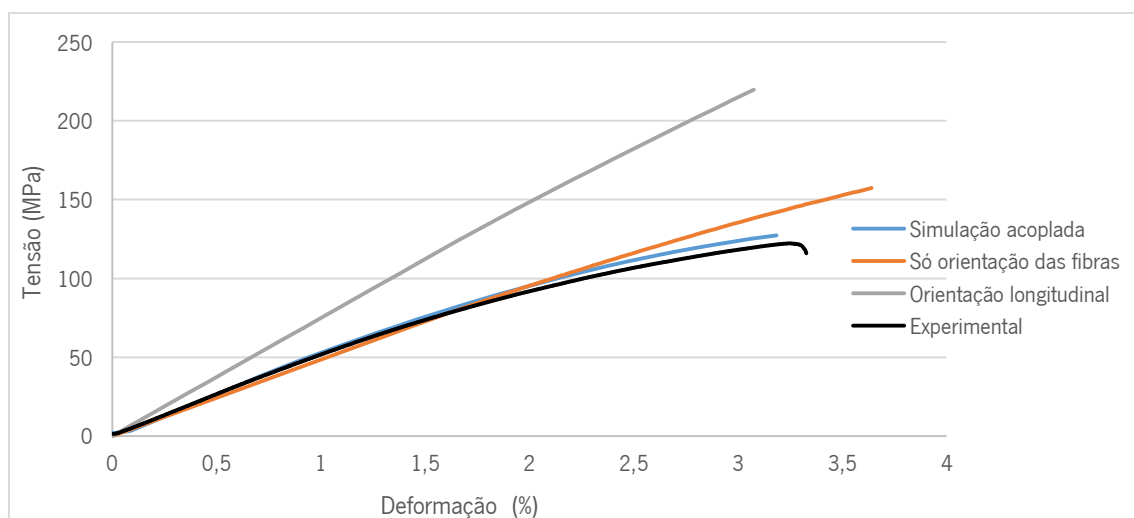


Figura 61: Influência dos dados mapeados.

Como se pode observar, os resultados obtidos utilizando a orientação pré definida são muito diferentes dos experimentais, como seria de esperar, já que as orientações simuladas no MoldFlow não se encontram tão orientadas no sentido do fluxo.

Pela observação do gráfico também se pode constatar que a utilização das orientações oriundas do MoldFlow melhora significativamente os resultados, aproximando-se bastante dos resultados experimentais, isto quando comparados à simulação utilizando as orientações pré definidas. No entanto, o gráfico ainda revela alguma diferença em relação à realidade, apresentando uma forma

ainda semelhante a uma reta, ou seja, o seu comportamento mecânico ainda está acima do espectável.

Finalmente, utilizando as tensões residuais juntamente com as orientações do MoldFlow é possível obter uma curva simulada bastante semelhante à curva experimental, apresentando um comportamento praticamente idêntico.

Concluindo, a orientação das fibras tem imensa influência nos resultados simulados e por este motivo é muito importante ter em conta as orientações induzidas durante o processo de fabrico, que neste caso foram simuladas pelo MoldFlow. Por sua vez, as tensões residuais apesar de não terem tanta influência nos resultados, revelam-se também importantes para que a simulação seja realista. Assim, é importante ter estes fatores em conta para futuras análises, uma vez que uma definição errada ou deficiente das orientações e das tensões residuais, provoca grandes diferenças nos resultados, e neste caso, no comportamento mecânico do material e, posteriormente, no componente a analisar estruturalmente.

Capítulo V - Caso de estudo: HYBRIDTEC

5.1. Enquadramento

O presente caso de estudo encontra-se enquadrado no âmbito de um projecto de desenvolvimento levado a cabo pelo PIEP, o projeto HYBRIDTEC, que tem como objetivo o desenvolvimento de um produto que seja capaz de substituir componentes metálicos por estruturas desenvolvidas com base em materiais poliméricos. Para tal, existiu uma validação final do produto (ensaaios experimentais), os quais seguiram os testes normativos mecânicos aplicados a veículos de categoria M1 da regulação *E/ECE/324 Rev.1/Add.16/Rev.4*.

O teste utilizado neste estudo consistiu na simulação estrutural de uma situação extrema, correspondente à aplicação de uma força frontal no banco, correspondente a uma massa de 75 kg (peso médio de uma pessoa). O objetivo deste teste consistia na avaliação da resistência do banco caso uma passageiro se sente na parte frontal do banco do automóvel.

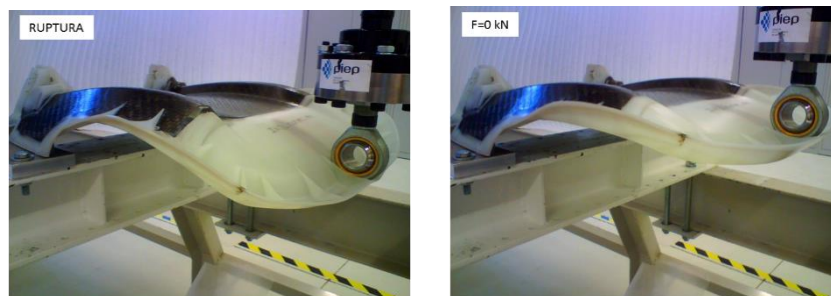


Figura 62: Ensaio experimental banco HYBRIDTEC.

O banco desenvolvido é composto por duas partes, uma constituída pelo material termoplástico que será utilizado neste caso de estudo, e um segundo elemento em compósito termoplástico (pré-impregnado). Para este caso de estudo foi utilizado um banco completamente em termoplástico, tendo este sido produzido e testado da mesma forma que a versão original desenvolvida no âmbito do projeto.

Neste capítulo iremos apresentar, de forma detalhada, os resultados obtidos para este caso de estudo, não focando o descritivo na metodologia, uma vez que será exactamente a mesma apresentada anteriormente. De referir apenas que os passos para a aplicação da metodologia foram os seguintes:

1. Simulação do processamento:
 - 1.1. Condições do processamento;
 - 1.2. Tensor de orientação das fibras;
 - 1.3. Tensões residuais.

2. Simulação constitutiva do material:

- 2.1. Utilização do Digimat-MF (modelação inicial do material);
- 2.2. Utilização do Digimat-MAP (mapeamento de tensões e orientações);
- 2.3. Utilização do Digimat-CAE (criação dos ficheiros de acoplamentos).

3. Simulação estrutural.

5.2. Simulação do processamento

A simulação do processo neste caso de estudo tinha como objetivo principal a obtenção do tensor de orientação das fibras e das tensões residuais. Para isso foi utilizada uma simulação do tipo *fill + pack + cool*, de modo a serem estudadas as etapas mais importantes para a formação de tensões residuais e para a orientação das fibras, ou seja, o enchimento, o empacotamento e o arrefecimento. O material utilizado foi o Technyl C216 V30 da Rhodia Polyamide Engineering Plastics que também será utilizado na simulação acoplada, através da modelação constitutiva do mesmo no Digimat.

No que toca ao processamento, foram utilizados os parâmetros mais indicados para o processamento deste material que correspondem aos valores estipulados na base de dados. Foram ainda utilizados quatro pontos de injeção, como se pode observar na figura 63. Estes pontos foram escolhido de forma a garantir um enchimento equilibrado da peça para o caso em que esta seria constituída por dois materiais.

No modelo numérico foi ainda utilizada uma malha 3D de elementos tetraédricos com aproximadamente 3mm de lado, apresentando 3851583 elementos no total.

Tabela 11: Propriedades do material.

Trade name	Technyl C216 V30
Family name	POLYAMIDES (NYLONS, PPA, ...)
Material Structure	Crystalline
Recommended injection temperature	280 °C
Recommended mold temperature	80 °C
Ejection temperature	170 °C
Solid density	1.3714 g/cm ³
Melt density	1.2102 g/cm ³

É importante ainda referir que o sistema de arrefecimento do molde não foi incorporado nos modelos, sendo os cálculos associados a este sistema efetuados segundo os parâmetros estabelecidos por defeito.

Através da análise no MoldFlow é então possível obter a previsão do tensor de orientação das fibras e as tensões residuais, apresentados nas figuras 63 e 64. Em anexo encontram-se também figuras com a rerepresentação do tensor de orientações e das tensões residuais da parte de trás do banco.

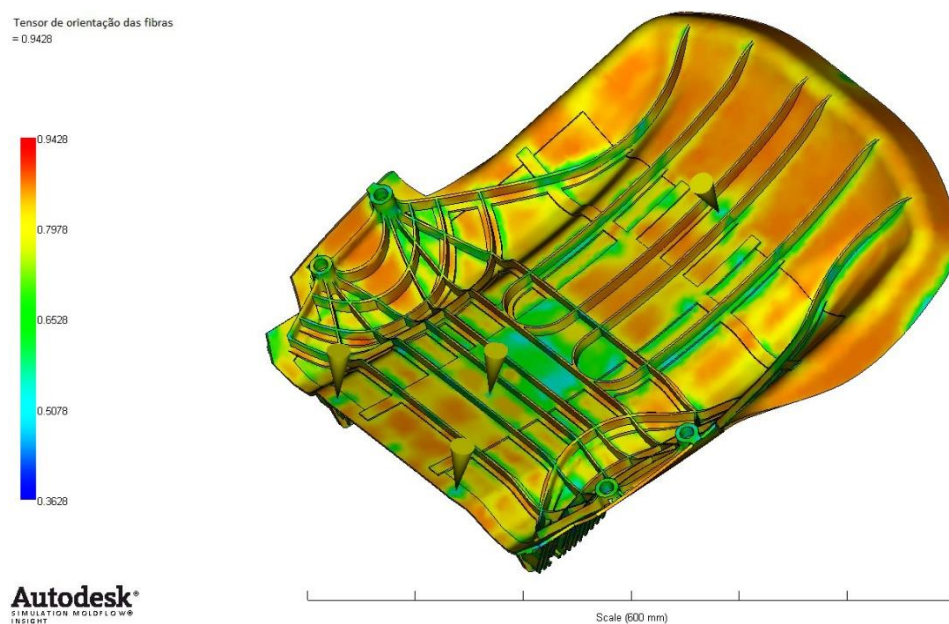


Figura 63: Tensor de orientação as fibras para o banco.

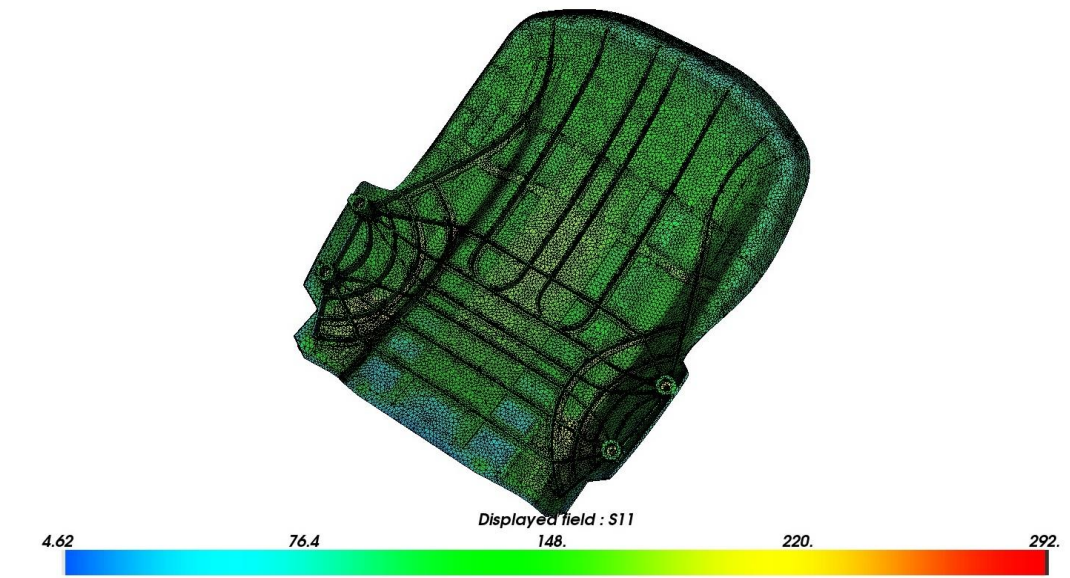


Figura 64: Tensões residuais do banco.

5.3. Simulação constitutiva do material

O material usado na simulação numérica foi o Technyl C216 V30 da Rhodia Polyamide Engineering Plastics, uma PA6 (poliamida 6) com 30% de fibra de vidro. De forma a modelar virtualmente este material são necessárias as propriedades mecânicas da matriz e da fibra. Para o caso da matriz de PA6, como não é possível obter as suas propriedades experimentalmente, a selecção e definição das propriedades necessárias foi realizada com base em literatura diversa (conforme apresentada na bibliografia), e foi também realizada uma pesquisa em bases de dados da Rhodia Polyamide Engineering Plastics. Quanto às propriedades da fibra de vidro, foram utilizadas as propriedades definidas para o caso de estudo dos provetes (36) (37).

Assim, chegou-se às propriedades descritas na tabela 12, que foram utilizadas na modelação do material compósito.

Tabela 12: Propriedades dos materiais.

Propriedades	Matriz (PA)	Reforço (Fibra de vidro)
Densidade (g/cm³)	1.14	2.54
Módulo de Young longitudinal (MPa)	3000	72000
Coefficiente de Poisson longitudinal	0.35	0.22
Tensão de cedência (MPa)	35	-
Módulo de <i>Hardening</i> (MPa)	21	-
Módulo de <i>Hardening</i> linear	140	-
Expoente de <i>Hardening</i> (MPa)	50	-

Neste caso de estudo foi adotado um procedimento semelhante ao descrito no caso de estudo dos provetes de modo a obter uma ideia dos parâmetros de *hardening*, tendo em conta algumas curvas tensão/deformação do PA6 pesquisadas.

Na definição da microestrutura, usaram-se os mesmos parâmetros que foram utilizados no caso de estudo dos provetes, isto porque a quantidade de fibra é igual para os dois casos. Estes parâmetros estão novamente representados na tabela 13.

Tabela 13: Parâmetros da microestrutura.

Geometria das fibras	Esferoide
Fração mássica	0.3%
Razão de aspeto	25

5.4. Validação do material

De forma a assegurar que as propriedades do material são as corretas e o comportamento mecânico do material coincide com o comportamento descrito pelo fabricante/experimental, foram realizadas algumas simulações utilizando o material modelado num caso de tração de um provete, segundo a norma ISO 527. Assim, foi possível uma comparação entre resultados experimentais realizados pelo PIEP a este material e resultados simulados através da simulação acoplada. A realização destas simulações foram também essenciais para a correta modelação do material, tendo sido possível a minimização de erros e resultados menos credíveis para a simulação da peça final (maior complexidade e tempo de computação), tendo sido possível verificar que o material estava modelado corretamente.

Foi executada uma análise acoplada, com a metodologia realizada para o caso dos provetes de flexão, mas com a utilização da geometria do provete à tração.

Para a realização da simulação numérica foram utilizados os parâmetros de processamento pré-definidos para este material, bem como uma simulação do tipo *fill+pack+cool* com o objetivo de estudar as fases da moldação por injeção que mais influenciam tensões residuais e orientação de fibras. Pode-se ainda referir que foi utilizada uma malha de elementos tetraédricos com aproximadamente 2mm de lado, apresentando 33266 elementos no total e três elementos segundo a espessura.

Tendo em conta que foi estudado o arrefecimento dos provetes, é importante referir que o sistema de arrefecimento utilizado era o mais semelhante possível ao presente no molde usado para a injeção experimental dos provetes.

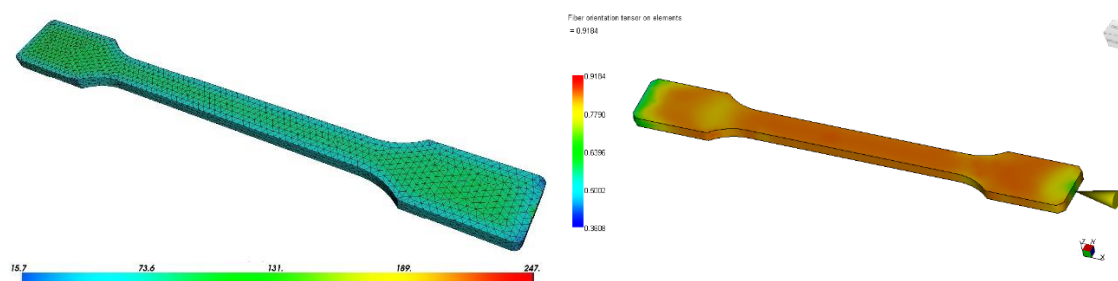


Figura 65: Resultados obtidos através da simulação numérica.

Para a simulação estrutural, e de modo a realizar uma simulação com condições próximas das condições experimentais, o provete foi dividido em três zonas, como se pode observar na figura 67. Na zona à direita da figura foram definidas as CFs, definindo-se esta zona como estando

encastrada. Na zona à esquerda da figura foram aplicadas as cargas e definiu-se, de modo a ser o mais semelhante aos testes de tração, como sendo uma carga definida segundo um deslocamento, que nos testes de tração foi, em média, de 3.5mm. É importante ainda referir que ambas as condições foram aplicadas nas faces superior e inferior do provete de modo a simular de melhor forma a ação das garras da máquina de testes.

O modelo numérico utilizado segue o esquema apresentado na figura 66. Neste utilizou-se uma malha de elementos tetraédricos lineares com aproximadamente 1.5mm de lado (cerca de 3 elementos à espessura), apresentando 22503 elementos no total.

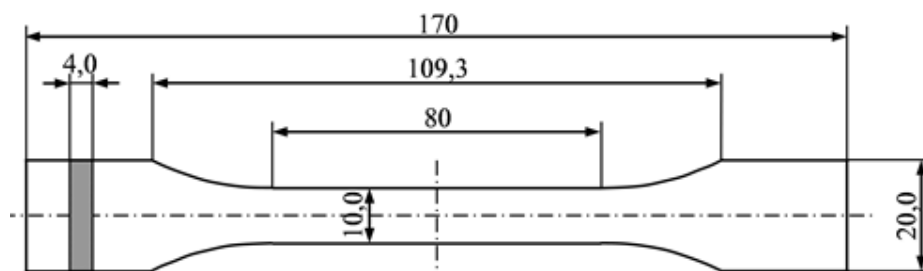


Figura 66: Dimensões provete de tração respeitando a norma ISO 527-2

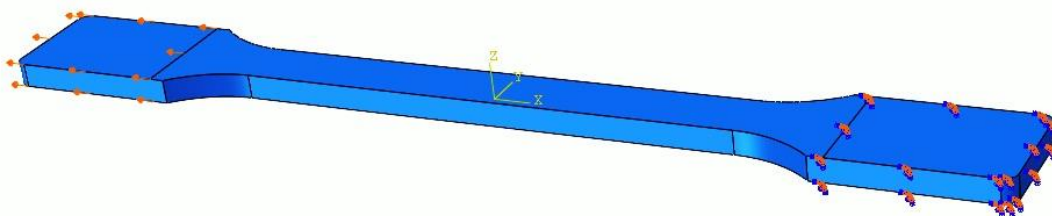


Figura 67: Modelo estrutural do provete.

Realizando a simulação acoplada é então possível fazer a comparação entre a simulação dos provetes de tração e os resultados experimentais dos ensaios de tração, apresentados na figura 68. Nesta figura são apresentadas as curvas tensão/deformação e as curvas força/deslocamento. A apresentação das curvas força/deslocamento deve-se ao facto de que para o caso da peça final não existem dados experimentais em termos de tensões e deformações, sendo importante verificar o comportamento do material em termos de força e deslocamento, e posteriormente tensão-deformação. Assim, foi possível verificar a concordância de ambas as curvas simuladas em função dos resultados experimentais.

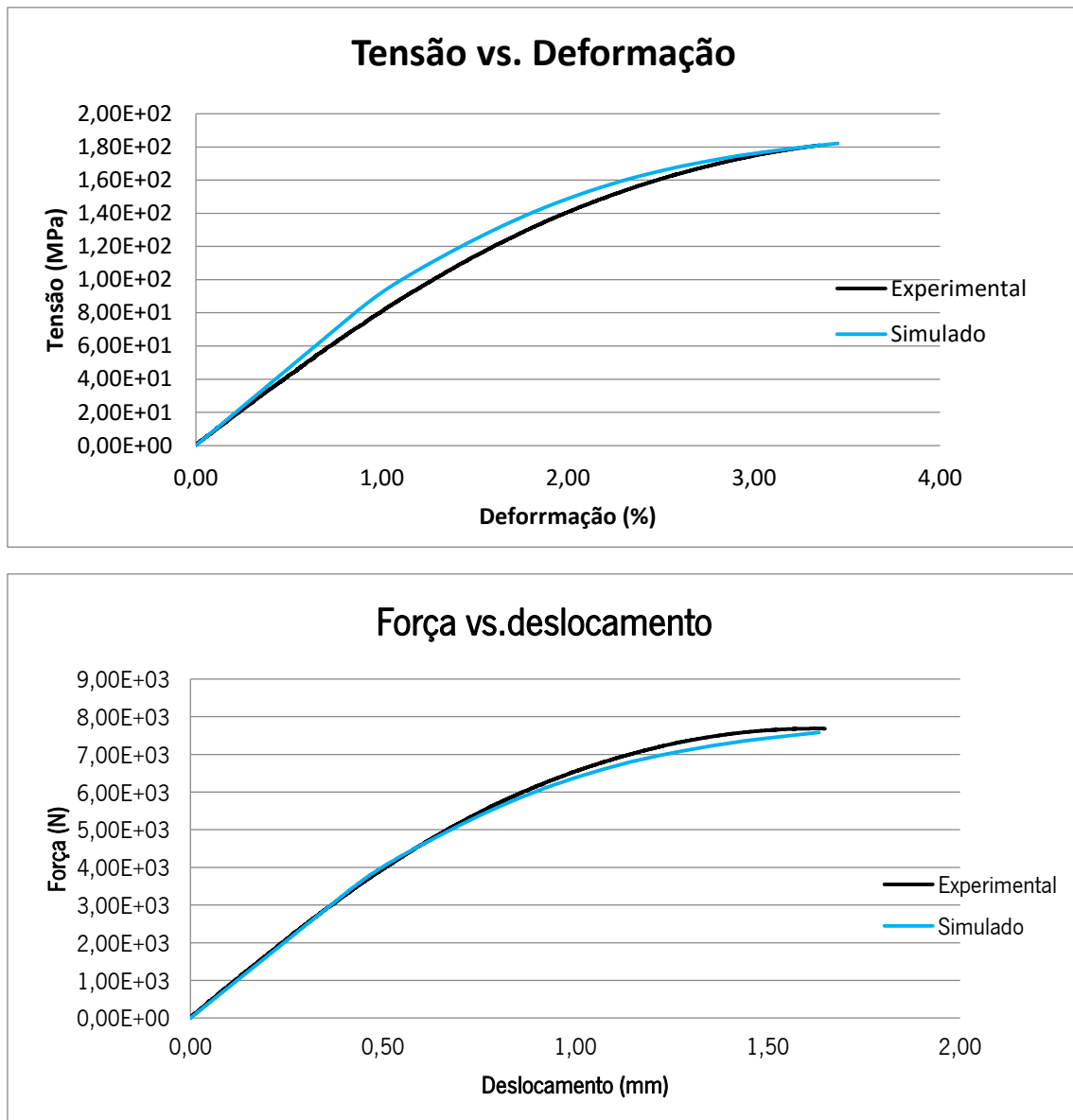


Figura 68: Comparação de resultados simulação acoplada vs. experimental.

Como podemos observar os resultados obtidos com a simulação acoplada são bastante semelhantes aos resultados dos ensaios de tração, demonstrando assim que a modelação deste material está correta e próxima da realidade experimental, sendo válida a sua utilização no caso de estudo do banco HYBRIDTEC.

5.5. Simulação estrutural

Por forma a avaliar a resistência da estrutura desenvolvida em situações extremas, foi desenvolvido um modelo numérico correspondente à aplicação de uma força frontal no banco correspondente à massa de uma pessoa (75 kg). O objetivo deste teste consistiu na avaliação da resistência do banco caso uma pessoa se sente na parte frontal do banco automóvel.

No modelo foram delimitadas as CFs e cargas de modo a, numericamente, simular o mais próximo possível a realidade experimental. É relevante referir em primeiro lugar que, na realidade, o banco seria preso a partir de incertos metálicos. No entanto, foram definidas as CFs como sendo um encastre da zona correspondente a estes elementos de aperto do banco. Quanto à carga, definiu-se como sendo uma força concentrada de 750N na extremidade do banco, como podemos observar na figura 69.

Neste modelo estrutural foi utilizada uma malha 3D de elementos tetraédricos com aproximadamente 3mm de lado. Para algumas zonas críticas (zona de encastramento / fixação), a malha utilizada foi refinada localmente, para que não existisse uma influência numérica (rigidez numérica) nos resultados finais de força de reação e, por um lado, para não tornar a simulação estrutural muito “pesada”. Assim, a malha apresentada é composta por 178587 elementos tetraédricos lineares no total.

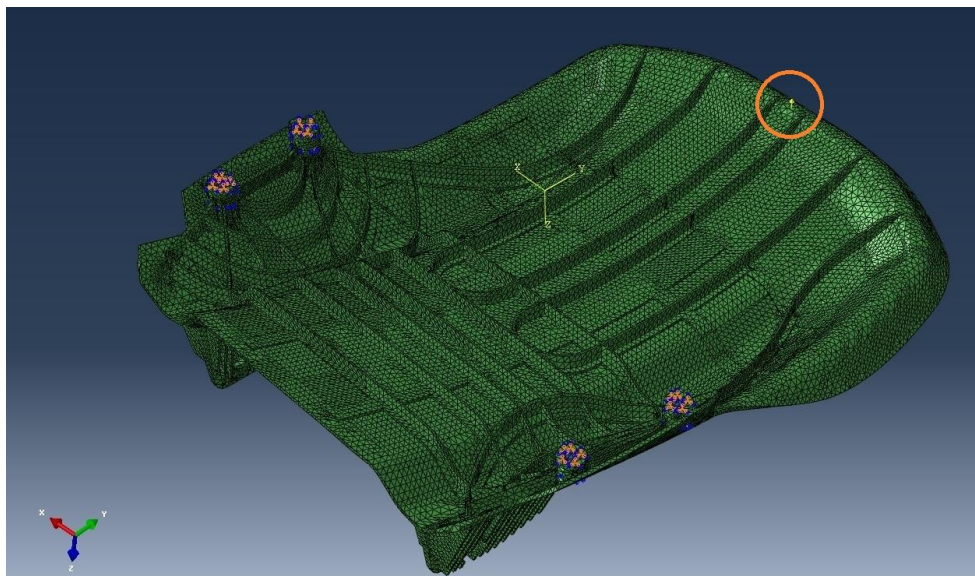


Figura 69: Condições fronteira e carga aplicada.

5.6. Resultados obtidos

Os resultados obtidos através da aplicação da metodologia de acoplamento foram comparados com os resultados obtidos através da simulação direta no ABAQUS (simulação com introdução de propriedades de material elastoplástico diretamente no modelo de material do ABAQUS) realizada no projeto original do PIEP. Para isso, foi necessário obter a evolução da força e deslocamento através da simulação acoplada, já que estas são as informações mais relevantes para caracterizar o comportamento mecânico da peça.

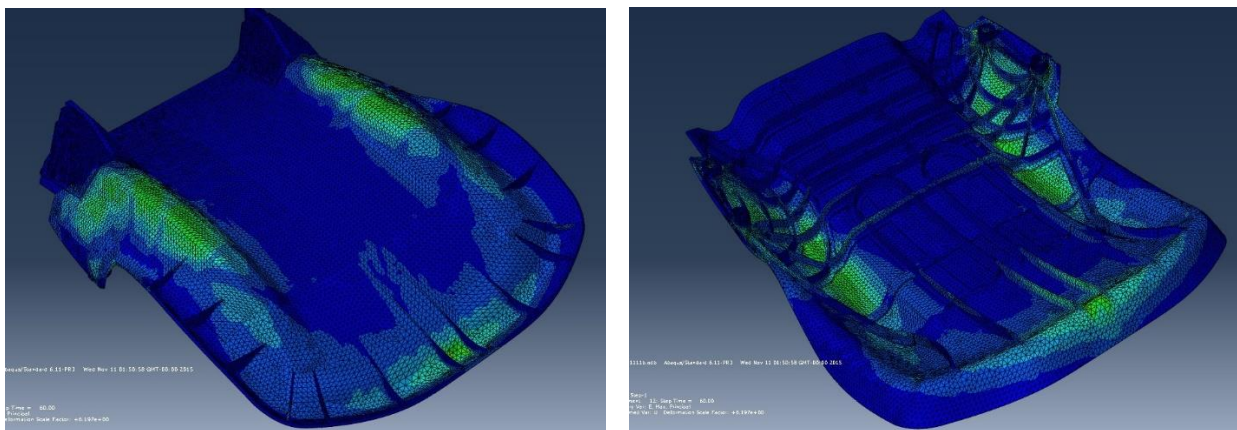


Figura 70: Resultados simulação acoplada. Deformação para a aplicação da força de 750N.

Após a execução da simulação acoplada é então possível observar as deformações presentes na peça, figura 70, e obter os valores de força e deslocamento ao longo do tempo, que possibilitam a construção da curva representativa do material, figura 71. De modo a possibilitar uma melhor percepção da diferença entre os dois resultados é ainda apresentada a tabela 14 com a percentagem da diferença das tensões para três pontos distintos das curvas.

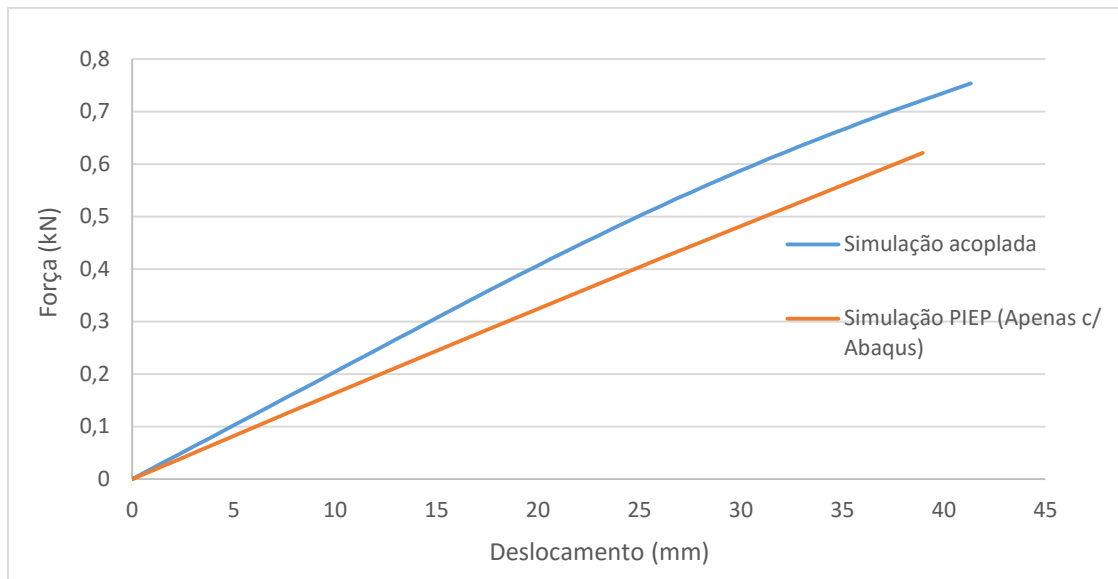


Figura 71: Comparação de resultados, simulação acoplada vs. simulação apenas com ABAQUS.

Tabela 14: Comparação de resultados, simulação acoplada vs. simulação apenas com ABAQUS.

Deformação	0,11	0,25	0,38
Tensão (Simulação acoplada) (MPa)	0,234837	0,505826	0,712029
Tensão (PIEP) (MPa)	0,18835	0,418629	0,621199
Diferença (%)	6,17	11,57	12,05

Através da observação do gráfico e da tabela, pode-se então constatar que os resultados obtidos através da simulação acoplada são bastante semelhantes aos resultados obtidos pela simulação apenas no ABAQUS. Isto seria expectável devido ao facto de que, neste caso onde a força é de 750N, apenas é possível observar a parte elástica do comportamento do material e porque na simulação utilizando apenas o ABAQUS o módulo do material compósito é definido diretamente como sendo o real. Assim, quanto mais próxima a simulação acoplada fosse dos resultados do PIEP mais próxima estaria da realidade.

No entanto, através destes resultados não existe a percepção das principais capacidades da simulação acoplada que é a previsão do comportamento mecânico do material após a cedência, ou seja, na zona plástica. Portanto, para que fosse possível a observação destas capacidades da simulação acoplada, foi ainda realizada uma simulação onde se aplicou um deslocamento de 150 milímetros substituindo a força de 750N.

A aplicação deste novo deslocamento permitiu a obtenção de toda a curva que caracteriza o comportamento mecânico do material, apresentada na figura 72, onde esta é comparada com os resultados experimentais realizados no PIEP e com a simulação, utilizando apenas o ABAQUS, também realizada no PIEP.

É importante ainda referir que este é um gráfico força / deslocamento, ao contrário dos restantes até agora. Isto porque, normalmente, os resultados de ensaios mecânicos de peças complexas são apresentados em termos de força / deslocamento devido às complexas áreas transversais que podem possuir e, assim, os únicos resultados experimentais fornecidos para a comparação encontram-se descritos em termos de força / deslocamento.

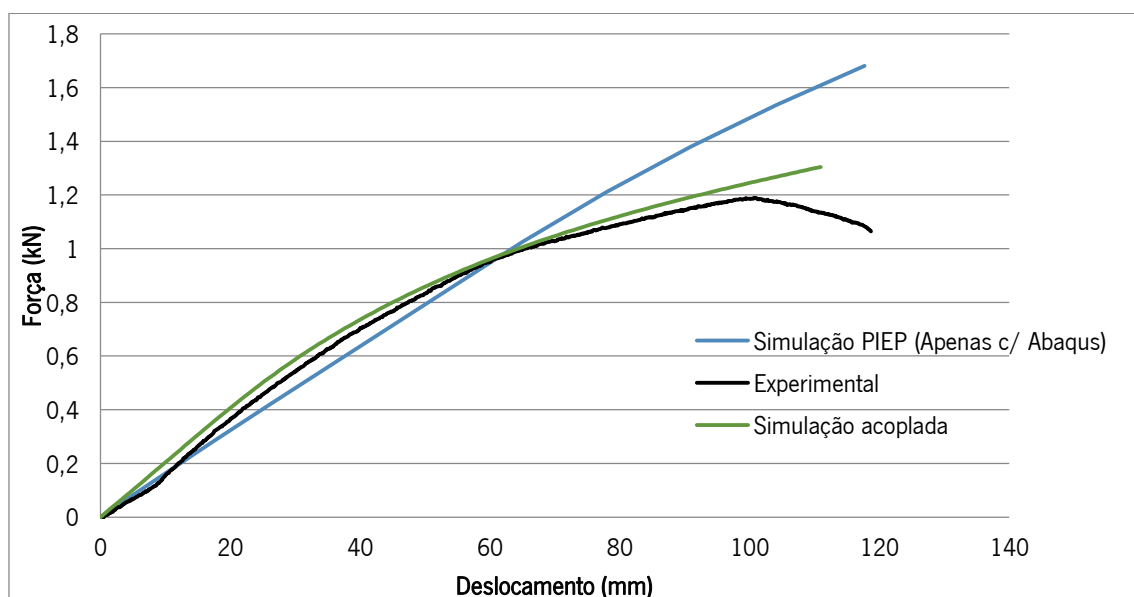


Figura 72: Comparação de resultados simulados vs. Experimentais.

Como pode ser observado no gráfico da figura 72, existe uma melhoria significativa quando é comparada a simulação acoplada com a simulação apenas no ABAQUS, aproximando-se bastante da curva experimental.

Como é óbvio, a partir do momento em que existe rotura do material (observada na curva experimental) as curvas da simulação deixam de fazer sentido porque não foi definido nenhum modelo para a rotura do material.

Concluindo, é então confirmado o que foi previsto após a realização do primeiro caso de estudo, ou seja, que é válida a aplicação destas metodologias de execução de análises acopladas num caso de estudo mais complexo, obtendo-se resultados simulados com um elevado grau de precisão à semelhança do que acontece para casos de estudo simples.

Capítulo VI - Conclusões

6.1. Caso de estudo: Flexão

Como já foi referido, este caso de estudo teve como finalidade a validação dos estudos relatados no capítulo III (estudos preliminares) de forma a que, através de um caso simples, fosse possível analisar as capacidades das metodologias de execução de análises acopladas utilizando os softwares Digimat, MoldFlow e ABAQUS, posteriormente aplicando estas metodologias num caso de estudo complexo e real.

Através da observação dos resultados obtidos neste caso de estudo conclui-se que foi possível prever, com um bom grau de confiança e precisão, as propriedades que caracterizam mecanicamente os materiais (neste caso específico reforçados). Quando comparado com a realidade experimental, e apesar de ser necessário fazer alguns ajustes na curva através dos parâmetros de *hardening*, os resultados são bastante satisfatórios e coerentes. Esta falta de informação relativamente aos parâmetros de *hardening* dos materiais poderá ser a limitação mais relevante desta metodologia e talvez até do *software*.

No que toca à influência das variáveis do processamento, existiram alguns resultados contraditórios. Nos resultados experimentais a velocidade de injeção causou um aumento das propriedades mecânicas enquanto que na simulação causou um decida, no entanto, devido à sua influência reduzida nos resultados experimentais não foi dada muita relevância a este erro. O caso da temperatura do molde, que nos resultados experimentais revelava elevada influência no comportamento mecânico do material, na simulação quase não provocava alterações nas propriedades. Este erro poderá considerar-se um pouco mais grave, no entanto, não se chegou ao porquê de se observar este erro nas simulações.

Conclui-se também que é de extrema importância ter em conta os chamados dados mapeados, neste caso orientação das fibras e tensões residuais, já que têm uma grande influência na previsão do comportamento mecânico da peça, principalmente as orientações das fibras que se revelaram fundamentais para a obtenção de resultados próximos da realidade.

Em suma, apesar de serem encontradas algumas lacunas nesta metodologia de execução de análises estruturais, os resultados obtidos com ela são bastante satisfatórios, revelando um elevado grau de precisão, e concluindo-se assim que a utilização desta metodologia poderá ser bastante interessante em casos complexos.

6.2. Caso de estudo: HYBRIDTEC

O objetivo deste caso de estudo seria a verificação das capacidades das metodologias de execução de análises acopladas, de modo a comprovar que, mesmo para casos complexos, os resultados obtidos utilizando estas metodologias teriam o mesmo grau de precisão no que toca a previsão do comportamento mecânico de materiais carregados com fibras.

Assim, como é possível constatar, através dos resultados obtidos para este caso de estudo, que existe também um grau de precisão bastante interessante quando tratamos casos complexos. Quando são comparados os resultados para o caso simples (provetes de flexão) e o caso complexo é possível observar que para o primeiro a precisão dos resultados simulados é superior. Isto, como é obvio, seria de esperar devido ao facto de que para o caso complexo foram feitas algumas aproximações no modelo estrutural que poderão ter influenciado os resultados, nomeadamente, na definição das condições fronteira, que não foram definidas a partir dos incertos metálicos utilizados na realidade experimental, mas sim diretamente na peça de maneira a tornar a análise estrutural um pouco mais simples e rápida.

Finalizando, chega-se à conclusão final de que a utilização deste tipo de metodologias de acoplamento de *softwares*, que utiliza MoldFlow, Digimat e ABAQUS, para a realização de análises estruturais mais realistas é bastante interessante e útil para efeitos de desenvolvimento do produto, revelando-se como um meio simples e preciso para a modelação de materiais carregados com fibras que, como foi observado ao longo deste trabalho, leva a resultados bastante semelhantes às realidades experimentais a que foram comparados.

6.3. Obstáculos encontrados

Como primeiro ponto, revelou-se bastante difícil encontrar informação experimental precisa e confiável referente à geometria exata das fibras/inclusões, bem como razões de aspeto relacionadas com estas. Este é um ponto importante, uma vez que a informação existente (seja experimental como teórica) não é abundante e existem ainda lacunas a este nível. A dependência do *software* em termos da definição da microestrutura obriga a que a caracterização experimental seja algo sempre necessário em vários aspetos, isto para que seja possível uma boa definição dos *inputs* da microestrutura e morfologia do material. Existe também um problema, já referido, relacionado com a falta de informação acerca dos parâmetros de *hardening*, para os quais foi

necessário a realização do estudo descrito no capítulo III, onde é também necessário recorrer aos dados experimentais obtidos através do ensaio de flexão.

Para além disso, e apesar desta metodologia de execução de análises estruturais, demonstrar excelentes resultados para o caso de estudo dos provetes, existem algumas complicações relacionadas com a metodologia de acoplamento que não foram abordadas até agora.

O principal problema na implementação desta metodologia foi a introdução das tensões residuais na análise estrutural final, cujo processo se revelou um pouco complexo. Isto porque, ao longo das várias tentativas para introduzir as tensões residuais, apareceram alguns erros relacionados com parâmetros da análise no ABAQUS, nomeadamente:

- Erro de subrotina UMAT, que surge devido ao facto de não ter sido copiado o conteúdo do ficheiro *.aba para o ficheiro *.inp;
- Erro de leitura das condições iniciais, que se relaciona com a utilização de “partes” e “*assemblies*” no ficheiro *.inp, o que não pode acontecer, e com o uso de conjuntos de nós em vez de conjuntos de elementos, isto porque as tensões iniciais são aplicadas em elementos e não em nós, no entanto o ABAQUS ao escrever as condições iniciais no *.inp cria “*nsets*” (conjuntos de nós) e não “*e/sets*” (conjuntos de elementos) o que impossibilita a importação das tensões.
- Resultados obtidos com e sem tensões iniciais são idênticos, que para este caso se deve à utilização do ficheiro de *backup* do material criado pelo ABAQUS e não o original do Digimat, sendo que o ficheiro criado pelo ABAQUS não possui a opção para o uso de tensões residuais.

Estes problemas, relacionados com a metodologia de acoplamento, foram ultrapassados, em grande parte devido à grande ajuda prestada pela equipa de suporte técnico do Digimat/e-Xstream.

Capítulo VII - Referências bibliográficas

- (1) – Roger A. Assaker, Laurent Tinel, Laurent Adam, Issam Doghri, Multi-Scale Material and Product Modeling Using DIGMAT and ABAQUS. *ABAQUS Users' Conference* (2004).
- (2) – Nemat-Nasser, S., Hori, M. Micromechanics: Overall Properties of Heterogeneous Materials. North-Holland (1999).
- (3) – Sharifah SHAHARUDDIN, Mohd. SALIT, Edi ZAINUDIN, A Review of the Effect of Moulding Parameters on the Performance of Polymeric Composite Injection Moulding. *Turkish J. Eng. Env. Sci.* 30, 23 - 34. (2006).
- (4) – Thomason J.L., The Influence of Fiber Properties of the Performance of Glass-Fibre Reinforced Polyamide 6, 6", *Composite Science and Technology*, 59, 2315-2328, (1999)
- (5) – Anon., Notes on Injection Molding, Intelligent System Laboratory, Michigan State University (1999).
- (6) – C.L. Tucker III and S.G. Advani, Composite Materials Series, in *Flow and Rheology in Polymer Composites Manufacturing*, Volume 10, S.G. Advani, ed., Elsevier, Amsterdam (1994).
- (7) – S.G. Advani and C.L. Tucker III, The use of tensors to describe and predict fiber orientation in short fiber composites, *J. Rheol.*, **31**, 751-784 (1987).
- (8) – Cristina A. Silva, Júlio C. Viana, Ferrie W.J. van Hattum, António M. Cunha, Fiber Orientation in Divergent/Convergent Flows in Expansion and Compression Injection Molding, *POLYM. COMPOS.*, 27, 539–551, (2006).
- (9) – F O'Dowd, M Le´vesque, and M D Gilchrist, Analysis of fiber orientation effects on injection molded components, Proc. IMechE Vol. 220 Part B: J. *Engineering Manufacture* (2006)
- (10) – A. J. PONTES, N. M. NEVES and A. S. POUZADA, The role of the interaction coefficient in the prediction of the fiber orientation in planar injection moldings, *Polymer Composites*. 3, 24, 358-366 (2003).
- (11) – P. C. POWELL, N. M. NEVES, G. ISDELL, and A. S. POUZADA, On the Effect of the Fiber Orientation on the Flexural Stiffness of Injection Molded Short Fiber Reinforced Polycarbonate Plates, *POLYMER COMPOSITES*, Vol. 19, No. 5, 640-651 (1998).
- (12) – Neves, N. M., Pontes, A. J. e Pouzada, A. S. Experimental validation of morphology simulation in glass fiber reinforced polycarbonate discs, *Journal Reinforced Plastics and Composites*. 6, Vol. 20, 452-465 (2001).
- (13) – Randy S. Bay and Charles L. Tucker III, Stereological measurement and error estimates for three-dimensional fiber orientation, *Polym. Eng. and Sci.*, v. 32, n. 4, 240-253 (1992).

- (14) – R. G. I'REUTING AND W. T. READ, JR., A Mechanical Determination of Biaxial Residual Stress in Sheet Materials, *Journal of Applied Physics* 22, 130 (1951).
- (15) – Tong-Hong Wang, Wen-Bin Young, Study on residual stresses of thin-walled injection molding, *European Polymer Journal* 41, 2511–2517 (2005).
- (16) – Sang Kyun Kim, Seok Won Lee and Jae Ryoun Youn, Measurement of residual stresses in injection molded short fiber composites considering anisotropy and modulus variation, *Korea-Australia Rheology Journal*, Vol. 14, No. 3 (2002).
- (17) – B.A. MLEKUSCH, Residual Stresses in Short-Fiber Reinforced Injection-Molded Thermoplastic Parts, *Mechanics of Time-Dependent Materials* 2: 129–169 (1998).
- (18) – Ligu Zhao, Nick A Warrior, Andrew C Long, ANALYSIS OF RESIDUAL STRESS IN FIBRE REINFORCED POLYMER COMPOSITES, *16TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS* (2007)
- (19) – Robert Grant Reid, The Measurement of Longitudinal Residual Stresses in Unidirectional Glass Fibre Reinforced Plastic, University of the Witwatersrand, Johannesburg (2009)
- (20) – Ch.-Sh. Chen, T.-J. Chen, Sh.-Ch. Chen and R.-D. Chien, OPTIMIZATION OF THE INJECTION MOLDING PROCESS FOR SHORT-FIBER-REINFORCED COMPOSITES, *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 47, No. 3 (2011).
- (21) – Cheng-Hsien Wu, Wan-Jung Liang, Effects of Geometry and Injection-Molding Parameters on Weld-Line Strength, *POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE*, 45:1021–1030 (2005)
- (22) – Lei Xie and Gerhard Ziegmann, Influence of processing parameters on micro injection molded weld line mechanical properties of polypropylene (PP), *Microsyst Technol*, 15:1427–1435 (2009)
- (23) – Michel Vincenta, T. Girouda, A. Clarkeb, C. Eberhardt, Description and modeling of fiber orientation in injection molding of fiber reinforced thermoplastics, *Polymer* 46:6719–6725 (2005)
- (24) – Manual do utilizador Digimat, versão 5.0.1
- (25) – Tea-Sung Jun *, Alexander M. Korsunsky. Evaluation of residual stresses and strains using the Eigenstrain Reconstruction Method. *International Journal of Solids and Structures*, 47 1678–1686 (2010).
- (26) – . Doghri and C. Friebe. Effective elasto-plastic properties of inclusion-reinforced composites. Study of shape, orientation and cyclic response, *Mechanics of Materials*, 37:45–68 (2005).
- (27) – Y. Benveniste. A new approach to the application of Mori-Tanaka theory in composite materials. *Mechanics of Materials*, 6:147-157 (1987).

- (28) – I. Doghri, C. Friebe, Effective elasto-plastic properties of inclusion-reinforced composites. Study of shape, orientation and cyclic response, *Mechanics of Materials*, 37:45–68 (2005).
- (29) – I. Doghri, A. Ouaar, Homogenization of two-phase elasto-plastic composite materials and structures Study of tangent operators, cyclic plasticity and numerical algorithms, *International Journal of Solids and Structures*, 40:1681–1712 (2003).
- (30) – I. Doghri, L. Tinel, Micromechanics of inelastic composites with misaligned inclusions: Numerical treatment of orientation, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 195:1387–1406 (2006).
- (31) – I. Doghri, L. Tinel, Micromechanical modeling and computation of elasto-plastic materials reinforced with distributed-orientation fibers, *International Journal of Plasticity*, 21:1919–1940 (2005).
- (32) – John W. Hutchinson, Generalizing J_2 flow theory: Fundamental issues in strain gradient plasticity, *Acta Mechanica Sinica*, 28(4):1078–1086 (2012).
- (33) – MoldFlow. Disponível em: www.autodesk.com. Acedido em: 10 de Fevereiro de 2015
- (34) – ABAQUS. Disponível em: www.3ds.com. Acedido em: 10 de Fevereiro de 2015
- (35) – G. Lielens. Micro-macro Modeling of Structured Materials. PhD thesis, Université catholique de Louvain (1999)
- (36) – Th. Malo, R. Ramaya, L. Adam, Th. Villette, R. Assaker, Nonlinear Multi-Scale Modeling of Reinforced Plastic Parts with DIGIMAT to RADIOSS, *e-Xstream engineering presentation* (2009)
- (37) – Rhodia. Disponível em <http://www.rhodia.com/>. Acedido em 12 de Outubro de 2015

Capítulo VIII - Anexos

8.1. Metodologia de acoplamento

1. Análise MoldFlow:

a. Inputs

- Propriedades do material;
- Condições de processamento;
- Modelo da peça.

b. Outputs

- Orientação das fibras;
- Tensões residuais;
- Malha do processo.

2. Análise ABAQUS

a. Inputs

- Cargas mecânicas;
- Condições fronteira;
- Modelo da peça.

b. Outputs

- Ficheiro *.inp, que contém a malha estrutural, cargas e condições fronteira.

3. Análise Digimat-MAP

a. Inputs

- Malha do processo;
- Malha estrutural;
- Orientação das fibras (MoldFlow)

b. Outputs

- Ficheiro *.dof, com as orientações mapeadas da malha do processo para a malha estrutural

4. Análise Digimat-MF

a. Inputs

- Propriedades elásticas da matriz e da fibra;
- Microestrutura do material.

b. Outputs

- Propriedades mecânicas do compósito;

- Matriz de rigidez;
- Curva tensão/deformação;
- Ficheiro *.daf, que contém informação acerca do material criado.
-

5. Análise Digimat-MAP novamente

a. Inputs

- Malha do processo;
- Malha estrutural;
- Tensões residuais (MoldFlow)

b. Outputs

- Ficheiro *.str, com as tensões residuais mapeadas da malha do processo para a malha estrutural

6. Análise Digimat-CAE

a. Inputs

- Ficheiro *.daf
- Ficheiro *.dof

b. Outputs

- Ficheiro *.mat
- Ficheiro *.aba
- Ficheiro *.log

7. Alteração do ficheiro *.inp

a. Inputs

- Linha de comando "INITIAL CONDITIONS, TYPE=STRESS, INPUT=tensões_residuais.str";
- Conteúdo do ficheiro *.aba criado pelo Digimat-CAE.

b. Outputs

- Ficheiro *.inp pronto a ser importado para o ABAQUS, contendo as orientações das fibras e as tensões residuais.

8. Análise ABAQUS

a. Inputs

- Ficheiro *.inp
- Ficheiro *.mat

- Ficheiro *.str

b. Outputs

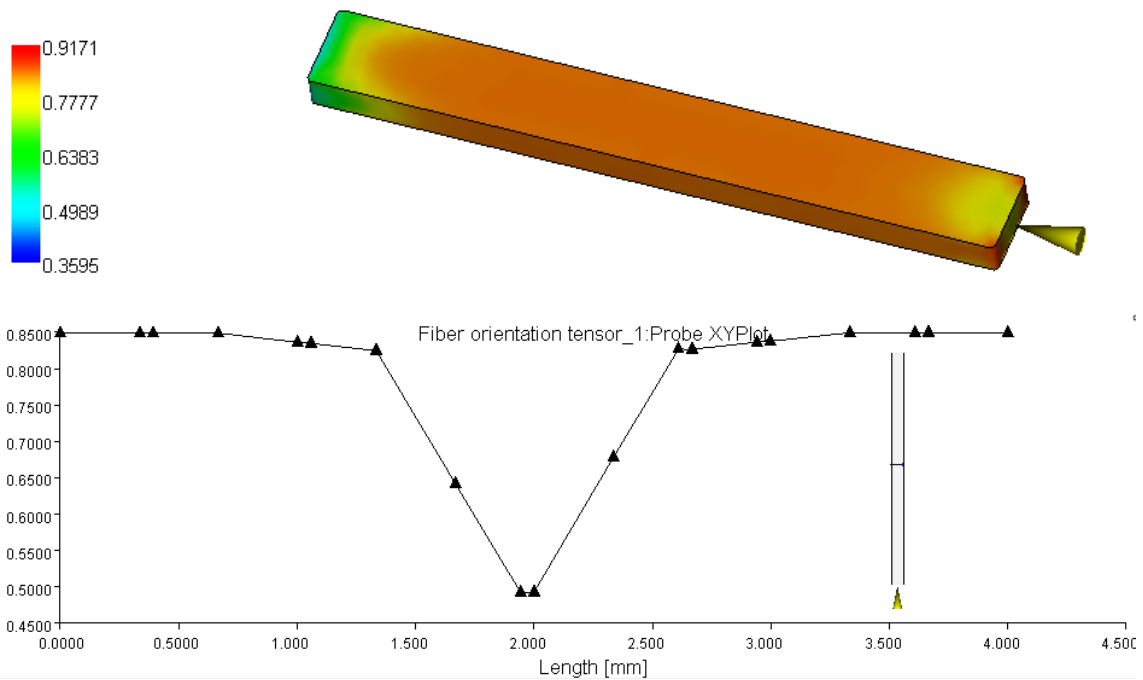
- Resultados da análise (Deformações, tensões, forças de reação, etc...)

8.2. Resultados obtidos no MoldFlow

Condição 2:

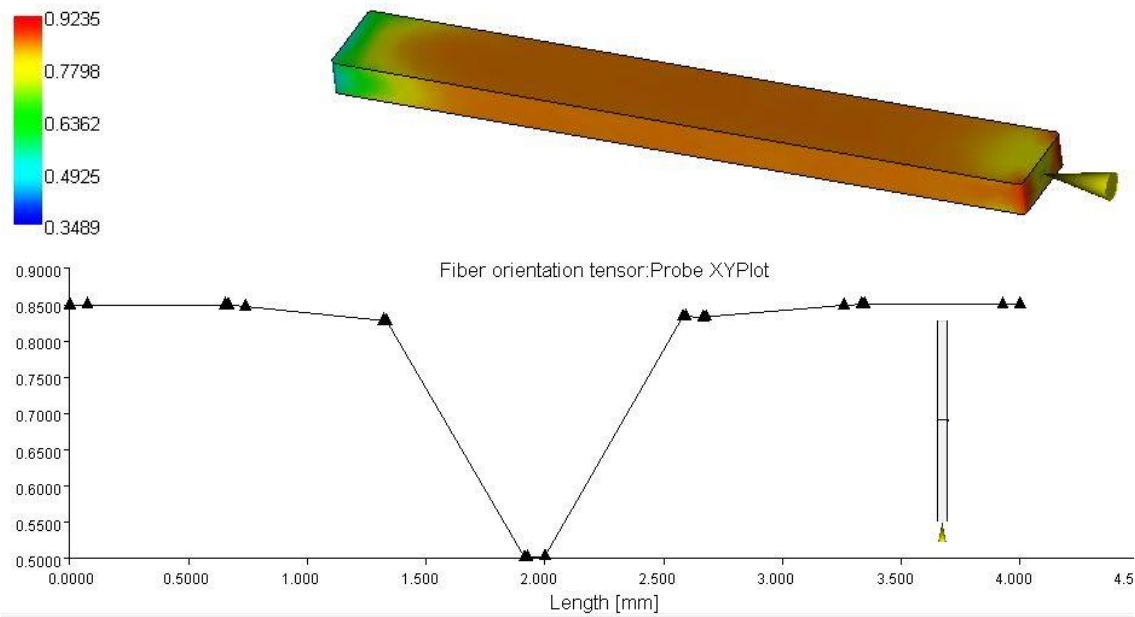
Fiber orientation tensor on elements

= 0.9171



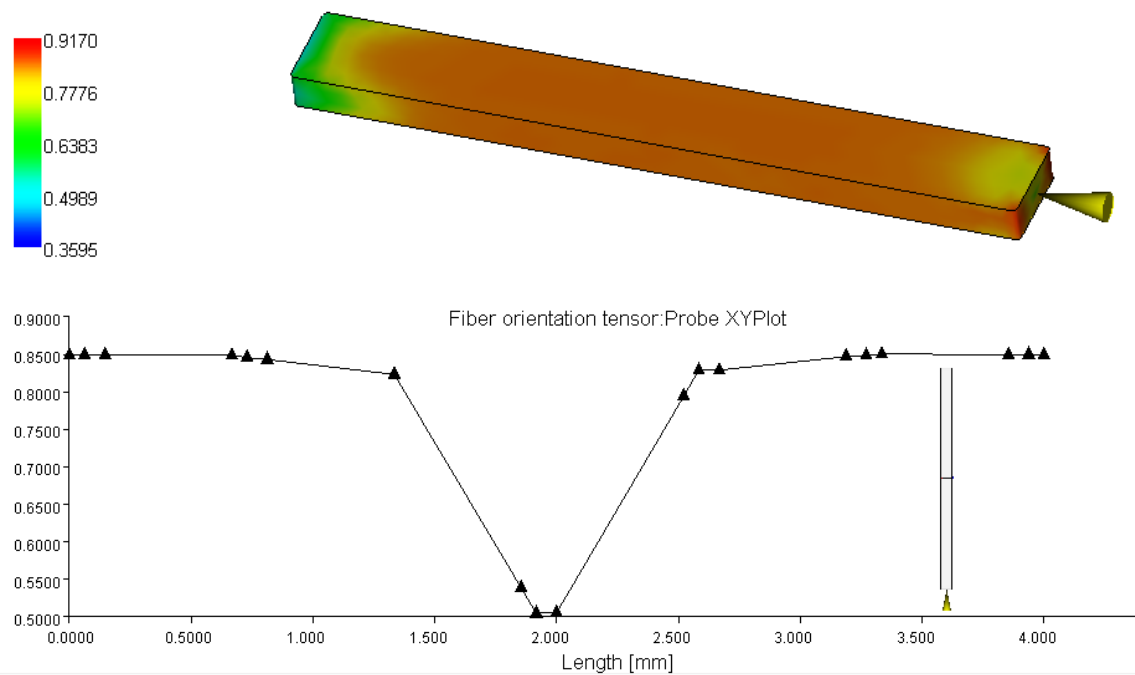
Condição 3:

Fiber orientation tensor on elements
= 0.9235

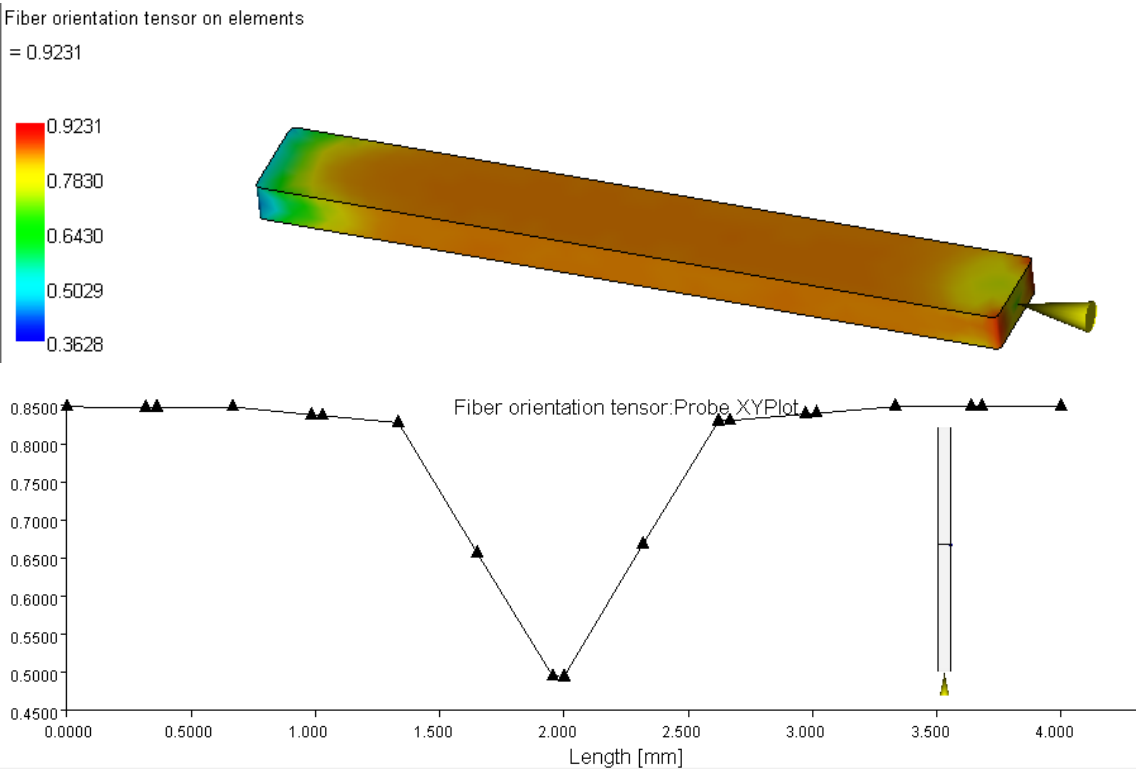


Condição 4:

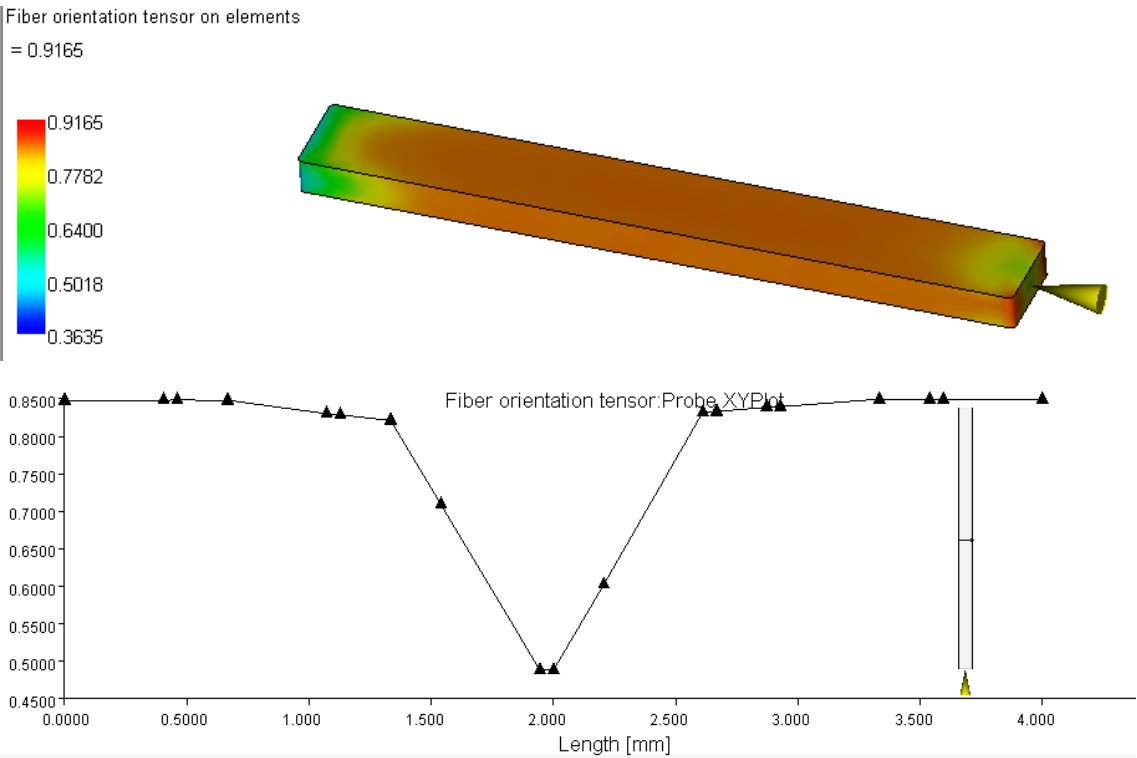
Fiber orientation tensor on elements
= 0.9170



Condição 5:

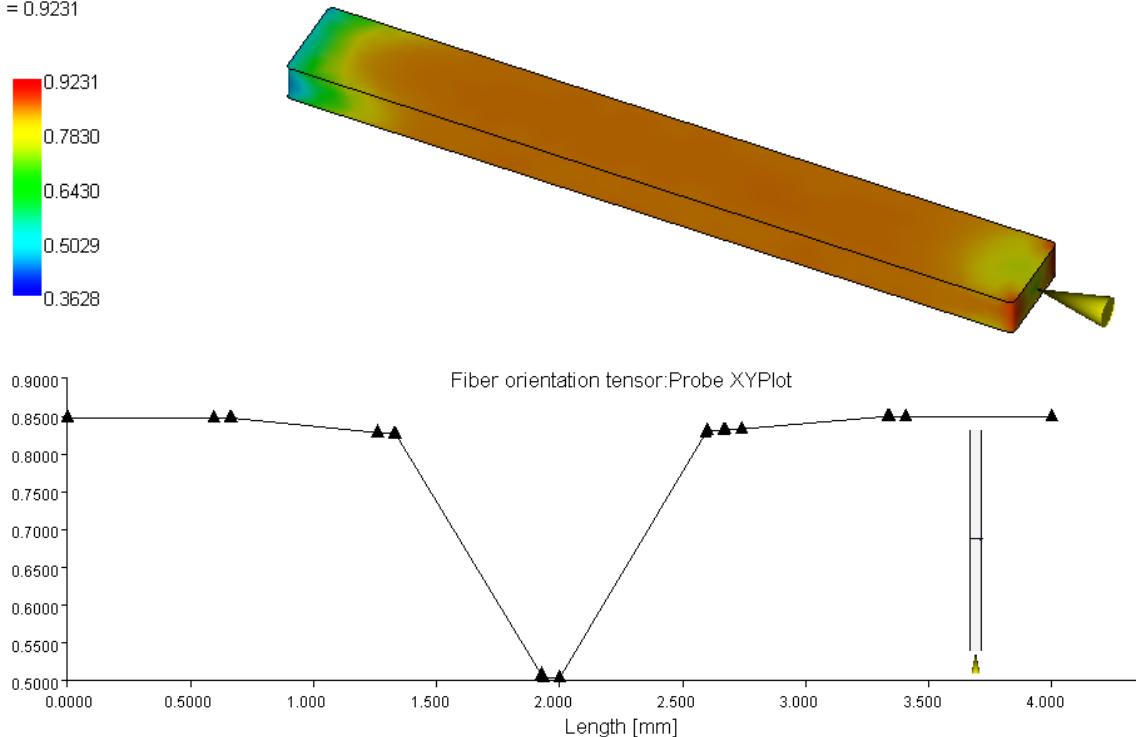


Condição 6:



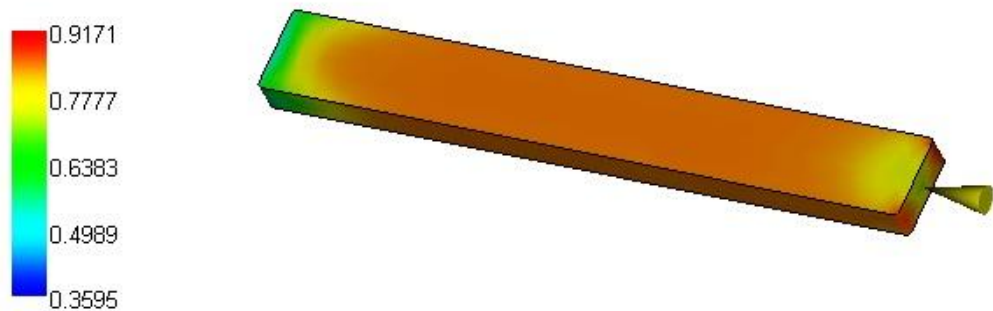
Condição 7:

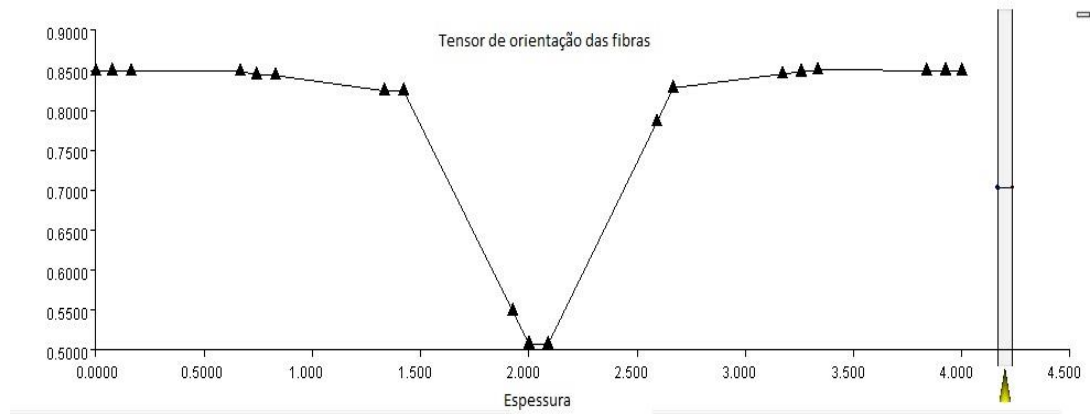
Fiber orientation tensor on elements
= 0.9231



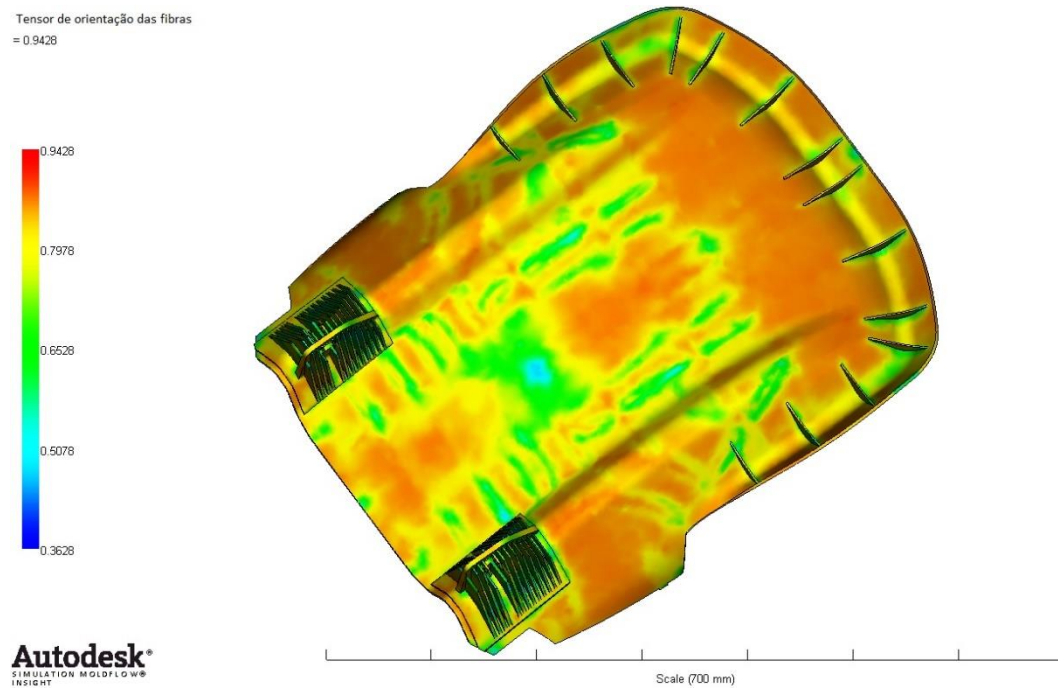
Condição 8:

Tensor de orientação das fibras
= 0.9171





Tensor de orientação das fibras para o caso HYBRIDTEC



Tensões residuais para o caso HYBRIDTEC

